

**DISEÑO CONCEPTUAL Y PRELIMINAR DE UN TUNEL
HIDRODINÁMICO PARA ESTUDIO DE
SUPERFICIES FUSELADAS**

RAÚL ANDRÉS ROLDAN BUITRAGO

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES.

FACULTAD DE INGENIERIAS

INGENIERÍA AERONÁUTICA

BOGOTÁ – COLOMBIA

2014

**DISEÑO CONCEPTUAL Y PRELIMINAR DE UN TUNEL
HIDRODINÁMICO PARA ESTUDIO DE
SUPERFICIES FUSELADAS**

RAÚL ANDRÉS ROLDAN BUITRAGO

Proyecto de grado para optar al título de ingeniero aeronáutico

Asesor

ING. MECÁNICO. FRANCISCO GONZALEZ.

Magister Desarrollo Sostenible e Instructor Especialista Aeronáutico

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES

FACULTAD DE INGENIERIAS

INGENIERÍA AERONÁUTICA

BOGOTÁ – COLOMBIA

2014

Expresar la gratitud que siento en un par de líneas no es suficiente, sin embargo este documento es la representación del esfuerzo y constancia para alcanzar un objetivo que solo logré gracias al apoyo incondicional de mis padres y familiares, pero en especial el apoyo de la persona más importante en mi vida pues soy quien soy gracias a ella, mi madre Luz Stella Buitrago a quien dedico este proyecto de grado. Y aprovecho estas líneas para recordar nuestra querida compañera la Ingeniera Sonia González QEPD quien en su momento me apoyó con sus sugerencias.

Dedicatoria.

AGRADECIMIENTOS.

Existen varias partes que hicieron posible alcanzar este proyecto de grado los cuales queremos agradecer de corazón por su apoyo y consejos a lo largo de la investigación, como lo son los profesores que nos educaron desde el primer semestre y sembraron la semilla de investigar e ir más allá de lo que nos enseñaban, como también aquellos profesores de últimos semestres quienes nos inspiraron a tener esta idea y desarrollarla como lo es el Ingeniero Jairo Martínez Escobar y el Ingeniero Aurelio Méndez . Profesores que nos guiaron en el desarrollo de la investigación nuestro estimado Ingeniero y tutor de proyecto Francisco González, el Ingeniero Jonathan Murcia, y el apoyo de nuestro director de la Facultad el Ingeniero Felipe Giraldo.

También agradecemos a familiares y amigos que de una u otra forma apoyaron el desarrollo y finalización no solo del proyecto sino también de nuestra carrera profesional.

Nota de aceptación:

Presidente del jurado:

Jurado:

Jurado:

Fecha. _____, _____, _____

CONTENIDO

Pág.

RESUMEN	21
INTRODUCCIÓN	22
OBJETIVOS.....	23
Objetivo General.....	23
Objetivos Específicos.....	23
1. ANTECEDENTES.....	24
1.1. UN POCO DE HISTORIA DE LOS TÚNELES DE PRUEBAS.....	24
1.2. TÚNEL DE VIENTO PARA SIMULACIÓN EN ALTITUD, Y CÁMARAS DE POTENCIA ESPACIAL.....	27
1.3. TÚNEL DE AGUA A LO LARGO DE LA HISTORIA	29
1.4. CRONOLOGÍA DE LA IMPORTANCIA DEL AGUA COMO MEDIO PARA EL DESARROLLO DE TECNOLOGÍAS	31
1.4.1. De 1600 a 1800..	33
1.4.2. De 1800 a 1900.	33
1.4.3. De 1900 a 1935.	34
1.4.4. De 1935 a 1950.	35
1.4.5. De 1950 a 1960.	36
1.4.6. DE 1960 a 1970	37
1.4.7. De 1970 a 1980.	39
1.4.8. De 1980 al presente.....	43
1.5. APLICACIONES DE LA HIDRODINÁMICA EN LA SOLUCIÓN DE PROBLEMAS AERODINÁMICOS	45
1.5.1. Establecimiento Aeronáutico Nacional de Ottawa, Canadá.....	46
1.5.2. Instituto de tecnología Pasadena, California.....	47
1.5.3. Corporación Northrop. División de aeronaves, California.	48

1.5.4.	Túnel de agua del Centro de Investigación de vuelo Dryden.....	49
2.	CONCEPTOS BÁSICOS DE MECÁNICA DE FLUIDOS	51
2.1.	PESO ESPECÍFICO, DENSIDAD, Y TEMPERATURA BASES.....	51
2.1.1.	Peso específico.....	51
2.1.2.	Densidad.....	52
2.1.3.	Viscosidad Absoluta o Dinámica (μ).....	53
2.1.4.	Fluido Newtoniano..	54
2.1.5.	Viscosidad Cinemática (μ).	55
2.2.	FLUJO Y LA ECUACIÓN DE CONTINUIDAD	56
2.3.	ECUACIÓN DE BERNOULLI.....	58
3.	FLUJO EN TUBERÍAS, NÚMERO REYNOLDS Y PÉRDIDAS DE ENERGÍA.	63
3.1.	TUBERÍAS.....	63
3.1.1.	Diámetro Nominal y Diámetro Real.....	64
3.1.2.	Cédula o calibre en tuberías.	65
3.1.3.	Que es el RDE?.	66
3.1.4.	Uniones y accesorios de tuberías.	67
3.2.	FUERZAS RESULTANTES EN SISTEMAS DE TUBERÍAS –FLUIDO ESTÁTICO	68
3.3.	CENTRO DE PRESIÓN.....	69
3.4.	PÉRDIDAS Y GANANCIAS DE ENERGÍA	70
3.4.1.	Fricción del fluido.	70
3.4.2.	Ecuación de Darcy.....	72
3.4.3.	Pérdidas de energía en flujo laminar.	72
3.5.	Número Reynolds.	74
3.5.1.	Numero Reynolds en cuerpos sumergidos en fluido.....	76
3.5.2.	Capa Límite.....	78
3.5.3.	Perfiles de Velocidad.	80
3.5.4.	Perfil De Velocidad Flujo Laminar.....	80
3.5.5.	Perfil de velocidad para flujo turbulento..	81

3.5.6.	Flujo en secciones no circulares.....	82
3.5.7.	Radio hidráulico.....	83
3.5.8.	Número de Reynolds para secciones no circulares.....	83
3.6.	PÉRDIDAS DE ENERGÍA	84
3.6.1.	Perdida de energía flujo turbulento.....	84
3.6.2.	Rugosidad relativa.....	84
3.6.3.	Perdidas de energía h_L	87
3.6.4.	Pérdidas por fricción en secciones transversales no circulares.....	88
3.6.5.	Pérdidas menores, según el coeficiente de resistencia.....	88
3.6.6.	Expansión Súbita.....	89
3.6.7.	Pérdida en la salida de un ducto a un depósito.....	90
3.6.8.	Pérdida en una expansión gradual.....	90
3.6.9.	Contracción Súbita.....	92
3.6.10.	Contracción gradual.....	94
3.6.11.	Pérdida en la entrada.....	95
3.6.12.	Longitud equivalente y Coeficientes de resistencia para accesorios.....	96
3.6.13.	Resumen de pérdidas y tuberías en serie.....	98
3.7.	FÓRMULAS DE HAZEN –WILLIAMS PARA EL FLUJO DE AGUA	99
4.	FUENTE DE MOVIMIENTO.....	102
4.1.	POTENCIA REQUERIDA POR LAS BOMBAS.....	102
4.1.1.	Eficiencia mecánica de las bombas.....	103
4.1.2.	Parámetros para selección de bombas.....	104
4.2.	TIPOS DE BOMBAS.....	105
4.2.1.	Bombas de desplazamiento positivo.....	106
4.2.2.	Bombas Cinéticas.....	106
4.2.3.	Datos De Rendimiento De Bombas Centrífugas.....	107
4.2.4.	Carga Estática Total.....	107
4.2.5.	Carga de succión neta positiva (NPSH).....	108
4.2.6.	Cavitación.....	108
4.2.7.	Presión de vapor.....	110

4.2.8.	NPSH.....	110
4.2.9.	Línea De Succión.....	112
4.2.10.	LÍNEA DE DESCARGA..	112
5.	DISEÑO PRELIMINAR DE UN TÚNEL HIDRODINÁMICO PARA VISUALIZACIÓN DE CUERPOS FUSELADOS.....	114
5.1.	ANÁLISIS DE DISEÑO SECCIÓN DE VISUALIZACIÓN.....	114
5.1.1.	Elección de dimensiones..	114
5.1.2.	Conclusión de dimensiones y materiales.....	120
5.2.	CÁLCULOS DE FLUJO Y PARÁMETROS DE DISEÑO	125
5.2.1.	Sección De Visualización.....	125
5.2.2.	Análisis de diseño de la sección de filtrado y difusor de salida.....	131
5.2.3.	Características de la sección de filtrado.	132
5.3.	LÍNEA DE SUCCIÓN Y DESCARGA.....	134
5.3.1.	Detalles de la línea de succión.	135
5.3.2.	Detalles de la línea de descarga.....	136
5.4.	PRESIONES EN EL SISTEMA ESTÁTICO	136
5.5.	ELECCIÓN DE BOMBA.....	140
5.5.1.	Potencia requerida en la bomba para el sistema..	140
5.6.	PÉRDIDAS DE ENERGÍA	142
5.6.1.	Perdida en la entrada h_1	143
5.6.2.	Pérdida de energía en la línea de succión h_2	144
5.6.3.	Pérdida de energía en las válvulas h_3	146
5.6.4.	Pérdidas de energía en codos de 90° h_4	147
5.6.5.	Pérdida por fricción en la línea de descarga h_5	148
5.6.6.	Pérdida en la salida (expansión gradual) h_6	148
5.6.7.	Pérdidas de energía en reductores h_7	149
5.6.8.	Pérdida de energía en la sección de visualización h_8	151
5.7.	VARIACIÓN DE PRESIONES EN EL CIRCUITO DEL TÚNEL DEBIDO AL FLUIDO EN MOVIMIENTO	153
5.8.	CARGA DINÁMICA TOTAL h_a	154

5.9.	CÁLCULO DEL NPSH DEL TÚNEL Y SISTEMA	155
5.10.	SECCIÓN DE LAMINACIÓN O ASENTAMIENTO DE FLUJO	158
5.11.	CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS DE DISEÑO.....	159
5.11.1.	Características finales del túnel.	160
6.	MÉTODO DE VISUALIZACIÓN.....	162
6.1.	MÉTODO DE INYECCIÓN DE TINTA	162
6.2.	INYECCIÓN DE TINTAS A TRAVÉS DEL MODELO EN PRUEBA.....	163
7.	RECOMENDACIONES PARA CONSTRUCCIÓN Y MANTENIMIENTO DEL TÚNEL HIDRODINÁMICO	164
8.	ANALISIS Y RECOMENDACIONES DEL PROTOTIPO A ESCALA.....	165
9.	CONCLUSIONES	168
	BIBLIOGRAFÍA	169
	ANEXO A. LIMPIEZA Y MANTENIMIENTO DEL TÚNEL.....	171
	ANEXO B. PRESUPUESTO.....	175
	ANEXO C. DIMENSIONES Y VISTAS TÚNEL.....	176

LISTA DE ILUSTRACIONES

	pág.
Ilustración 1 Francis Herbert Wenham (1824, Kensington – 1908).....	24
Ilustración 2 Horatio Frederick Phillips 1845 – 1926	25
Ilustración 3 Phillips Patented Aerocurves - 1884 & 1891.....	25
Ilustración 4 Túnel de viento de Joukowski.....	26
Ilustración 5 Túnel de viento con altitud simulada.....	27
Ilustración 6 B-29.	28
Ilustración 7 Drive Fan, Sección sur.....	28
Ilustración 8 Ludwig Prantl.	29
Ilustración 9 Cliford Truesdell.....	31
Ilustración 10 Leonardo Da Vinci 1512	32
Ilustración 11 Osborne Reynolds.	33
Ilustración 12 prototipos con doble configuración de alas.....	37
Ilustración 13 Ala OERA M6 simulación numérica.	38
Ilustración 14 CASA 212-200.....	39
Ilustración 15 Dr. Turgut Sarpkaya PhD 1954 en Mecánica e Hidráulica.....	40
Ilustración 16 Túnel de agua.....	41
Ilustración 17 Túnel de agua NAE	46
Ilustración 18 Ala sumergida en el túnel de agua NAE	46
Ilustración 19 Interacción de gases en el Túnel de agua NAE	47
Ilustración 20 Túnel de agua de superficie libre.....	48
Ilustración 21 Instalaciones de la corporación Northrop.....	48
Ilustración 22 ejemplo de un modelo a escala en la sección de prueba.	49
Ilustración 23 Acción de la viscosidad en un fluido (cohesión).	53
Ilustración 24 Esfuerzo cortante, gradiente de velocidad y altura.	54
Ilustración 25 Graficas de fluidos newtonianos y fluidos de Bingham.	55
Ilustración 26 Ejemplo de una parte de un sistema donde se presentan variaciones de velocidad, presión, y áreas.	58
Ilustración 27 Segmento de tubería con flujo de un fluido.....	59
Ilustración 28 Segmento de tubería, contra presión.....	60
Ilustración 29 Elementos de la ecuación de Bernoulli.....	61
Ilustración 30 Medidas para la relación RDE con (D/t).....	66
Ilustración 31 Tipos de codos de 90 grados.....	68
Ilustración 32 Vista frontal de un depósito. Distribución de presiones.	69
Ilustración 33 Régimen turbulento y laminar.	75

Ilustración 34 Flujo de Stoke,-Números Reynolds bajos -.....	76
Ilustración 35 Rugosidad en la superficie y campo de flujo.....	76
Ilustración 36 fuerzas actuantes por fricción, fluido estático y en movimiento.	78
Ilustración 37 fricción de fluido sobre una superficie.....	78
Ilustración 38 Capa límite - fluido viscos y no viscoso-.	79
Ilustración 39 Diferencia entre perfiles de velocidad, laminar y turbulento.....	80
Ilustración 40 zonas del perfil de velocidades.....	81
Ilustración 41 Perfil de velocidad flujo turbulento.	82
Ilustración 42 Diferentes secciones transversales no circulares.	82
Ilustración 43 Rugosidad en la pared del tubo.	84
Ilustración 44 Partes del diagrama de Moody.	86
Ilustración 45 Accesorio Expansión súbita.....	89
Ilustración 46 Expansión gradual.	91
Ilustración 47 Contracción Súbita.	93
Ilustración 48 Accesorio- contracción gradual.....	94
Ilustración 49 Coeficientes de resistencia de entradas.	96
Ilustración 50 Clasificación de bombas.	105
Ilustración 51 Ejemplo de operación de una bomba de desplazamiento positivo.	106
Ilustración 52 Partes de una bomba centrífuga.....	106
Ilustración 53 bomba ejemplo. Gráfica de carga total versus caudal.	107
Ilustración 54 carga estática total.....	107
Ilustración 55 cavitación.....	108
Ilustración 56 Daño por cavitación.	109
Ilustración 57 Tipos de reductores a) excéntrico. b) concéntrico.	112
Ilustración 58 Posibles válvulas en la Línea de descarga.	113
Ilustración 59 Dimensiones A380.....	115
Ilustración 60 RHRC modelo 0710.....	115
Ilustración 61 Sección de visualización del modelo 0710 RHRC.	116
Ilustración 62 Dimensiones preliminares.....	117
Ilustración 63 Láminas de Acrílico.	119
Ilustración 64 Dimensiones y material final del túnel en desarrollo.	120
Ilustración 65 Medida de altura del túnel.....	121
Ilustración 66 Sistemas de recirculación.	122
Ilustración 67 Sentido de circulación del flujo.	122
Ilustración 68 Bomba centrífuga.....	123
Ilustración 69 Ubicación de la bomba.	123
Ilustración 70 Ubicación de la sección de laminación.	124
Ilustración 71 Diagrama preliminar del túnel hidrodinámico.....	124

Ilustración 72 Imagen preliminar Túnel hidrodinámico.....	125
Ilustración 73 Perfil de velocidades.....	128
Ilustración 74.....	128
Ilustración 75 Perfil de velocidades en la sección de visualización. a) Parte superior b) Parte inferior.	129
Ilustración 76 Perfil de velocidad sección de visualización.	130
Ilustración 77 Difusor de salida.	131
Ilustración 78 Perfil de velocidad en sección de filtrado y limpieza.	132
Ilustración 79 parte interna de las secciones de contracción y expansión gradual.	133
Ilustración 80 Perfil de velocidad del difusor.	134
Ilustración 81 Circuito de tubería en el túnel hidrodinámico.....	136
Ilustración 82 Puntos para estudio de presiones en el sistema.	138
Ilustración 83 relación de diámetros.	144
Ilustración 84 relación de diámetros.	144
Ilustración 85 Dimensiones del difusor (expansión gradual).	149
Ilustración 86 Contracción Gradual.	150
Ilustración 87 Expansión Gradual.	151
Ilustración 88 Sección principal del túnel.	152
Ilustración 89 Corrector de flujo y sección de laminación.	158
Ilustración 90 Corrector de flujo.	159
Ilustración 91 Inyección de tinta para visualización.	162
Ilustración 92 Método local de inyección de tintas.	163
Ilustración 93 Prototipo túnel hidrodinámico a escala.....	166
Ilustración 94 Problema de aire atrapado en el sistema.....	166
Ilustración 95 Válvula de alivio de aire.....	167
Ilustración 96 Implementación válvulas de control de flujo.....	167
Ilustración 97 Implementación del sistema de inyección de tintas.....	168
Ilustración 98 Consejo en el uso de filtros para limpieza.....	172
Ilustración 99 Vista lateral difusores.....	176
Ilustración 100 Vista frontal Difusores.....	176
Ilustración 101 Tapa sección de prueba.....	177
Ilustración 102 Sección de prueba.....	178
Ilustración 103 Vista preliminar túnel hidrodinámico.....	179

LISTA DE TABLAS.

	pág.
Tabla 1 Peso específico del agua a distintas temperaturas	51
Tabla 2 Temperatura y densidad del agua.....	52
Tabla 3 Propiedades físicas del agua.	56
Tabla 4 Unidades de flujo con respecto al tiempo.	57
Tabla 5 Tamaños nominales de tuberías.	63
Tabla 6 Comparación entre diámetro interno y externo a diferentes cédulas.	64
Tabla 7 Tabla de Tuberías Amanco- diferencias entre distintas cedulas.	65
Tabla 8 Presión sobre tuberías de PVC.....	65
Tabla 9 Dimensiones de tuberías a diferentes RDE.....	67
Tabla 10. Coeficientes de diferentes materiales y rugosidad relativa.	85
Tabla 11 Diagrama de Moody.	87
Tabla 12 Coeficiente de resistencia para expansión gradual.....	91
Tabla 13 Coeficiente de resistencia para contracción súbita.	93
Tabla 14 Coeficiente de resistencia para contracción súbita.	94
Tabla 15 Coeficiente de resistencia, contracción gradual con ángulo (θ) $\theta \geq 15^\circ$, $\theta < 15^\circ$	95
Tabla 16 Longitud equivalente en diámetros de tubería.	97
Tabla 17 Coeficiente de Hazen-Williams (H&W) Ch.	100
Tabla 18 Diferentes alternativas de la fórmula Hazen-Williams.	100
Tabla 19 Nomograma de Hazen-Williams con Ch=100	101
Tabla 20 Características del agua, presión de vapor (presión kPa, carga m). Peso específico. ²⁰	110
Tabla 21 Índices de refracción.	118
Tabla 22 comparación de características entre el vidrio y el acrílico.	119
Tabla 23 Diagrama de Moody.	126
Tabla 24 Hoja de cálculo para perfil de velocidades en la sección de visualización.	129
Tabla 25 Presiones en los distintos puntos de estudio del sistema. Aplicación ecuación Bernoulli.....	138
Tabla 26 Presiones en diferentes puntos del sistema.....	154
Tabla 27 Presupuesto prototipo analizado.....	173
Tabla 28 Presupuesto prototipo escala 1:3.75.....	174

LISTA DE ECUACIONES.

	pág.
Ecuación 1 Peso específico	51
Ecuación 2 Peso obtenido de la ecuación 1.	51
Ecuación 3 formula de la densidad	52
Ecuación 4 Viscosidad cinemática	55
Ecuación 5 Reynolds con viscosidad absoluta y densidad	55
Ecuación 6 Reynolds con solo la viscosidad cinemática.....	55
Ecuación 7 caudal, o flujo volumétrico	57
Ecuación 8 Comportamiento de la masa de un flujo.....	57
Ecuación 9 Ecuación de continuidad.	58
Ecuación 10 Ecuación de continuidad en líquidos incompresibles	58
Ecuación 11 energía potencial.....	59
Ecuación 12 Energía cinética.....	59
Ecuación 13	60
Ecuación 14	60
Ecuación 15 Trabajo.	60
Ecuación 16 Energía de flujo	60
Ecuación 17 Energía total	60
Ecuación 18 Energía total, reemplazando con ecuaciones equivalentes	61
Ecuación 19	61
Ecuación 20 Ecuación de Bernoulli.....	61
Ecuación 21 Formula ISO base para ver la relación RDE con D/t).....	66
Ecuación 22 Ecuación de presión.	68
Ecuación 23 Ecuación correspondiente a Fuerza.....	68
Ecuación 24	69
Ecuación 25	70
Ecuación 26 Ecuación para hallar la pérdida de energía.	71
Ecuación 27 Extensión de la ecuación de Bernoulli aplicada para pérdidas y ganancias de energía.....	71
Ecuación 28 Energía por unidad de peso.	71
Ecuación 29	71
Ecuación 30 Ecuación de energía.	72
Ecuación 31 Ecuación de Darcy.	72
Ecuación 32 Ecuación de Hagen-Poiseuille.....	73
Ecuación 33 igualación de ecuaciones Darcy y Hagen Poiseuille	73
Ecuación 34	73
Ecuación 35 Ecuación para obtener el número Reynolds.....	73

Ecuación 36 Factor de fricción para flujo laminar.	74
Ecuación 37	74
Ecuación 38 Velocidad local en cualquier punto. flujo laminar.....	80
Ecuación 39 Velocidad local flujo turbulento.....	81
Ecuación 40 Radio hidráulico.....	83
Ecuación 41 Velocidad Promedio	83
$R = APM = \pi D^2 4 \pi D = D^4$ Ecuación 42 Equivalencia de diámetro con el radio hidráulico.....	83
Ecuación 43 Número Reynolds para secciones no circulares.	83
Ecuación 44 Factor de fricción para flujo turbulento.	88
Ecuación 45 Pérdidas de fricción para secciones transversales no circulares.	¡Error! Marcador no definido.
Ecuación 46 Pérdida menor de energía.....	88
Ecuación 47 Coeficiente de resistencia para accesorios de expansión súbita.	89
Ecuación 48 Pérdida de energía a la salida.....	90
Ecuación 49 Presión en un difusor ideal.....	92
Ecuación 50 Presión en un difusor real.....	92
Ecuación 51 Pérdida de energía contracción súbita.	92
Ecuación 52 Coeficiente de resistencia para acoplamientos y válvulas.	97
Ecuación 53 H&W. Velocidad Promedio sistema inglés.	99
Ecuación 54 Adición de potencia por una bomba.	102
Ecuación 55 Adición de energía en el sistema.	103
Ecuación 56 Margen entre la carga de succión neta requerida y disponible.	111
Ecuación 57 Carga de succión neta disponible.	111
$V_{cuboide} = L \cdot h \cdot w$ Ecuación 58	125
Ecuación 59 Perímetro mojado de la sección de visualización.....	127
Ecuación 60 Radio Hidráulico.	127
Ecuación 61 velocidad de flujo máximo.	127
Ecuación 62	132
Ecuación 63	133
Ecuación 64 Flujo volumétrico mínimo para la bomba del sistema.....	140
Ecuación 65 Potencia disponible.	141
Ecuación 66 Energía disponible en relación a la potencia de la bomba.	141
Ecuación 67 Pérdida de energía en la sección de visualización.....	143
Ecuación 68 Número Reynolds para la línea de succión. Diámetro 2".	145
Ecuación 69 Factor de fricción línea de succión diámetro de 2".....	145
Ecuación 70 Número Reynolds para la línea de succión. Diámetro 1".	145
Ecuación 71 Factor de fricción línea de succión diámetro de 1".....	146
Ecuación 72 Pérdida de energía línea de succión.	146

Ecuación 73 Pérdida de energía en tubería de 1".....	146
Ecuación 74 Pérdida de energía en tubería de 2".....	146
Ecuación 75 Pérdida de energía en válvulas de 1".....	147
Ecuación 76 Pérdida de energía en válvulas de 2".....	147
Ecuación 77 Pérdida de energía total en válvulas.	147
Ecuación 78 Pérdida de energía en codos de 90° Diámetro de 1".....	147
Ecuación 79 Pérdida de energía en codos de 90° Diámetro de 2".....	147
Ecuación 80 Pérdida de energía total en codos de 90°	148
Ecuación 81 Pérdida por fricción en la línea de descarga. Diámetro 1".....	148
Ecuación 82 Pérdida por fricción en la línea de descarga. Diámetro 2".....	148
Ecuación 83 Pérdida total por fricción en la línea de descarga.....	148
Ecuación 84 Pérdida de energía en la salida.....	149
Ecuación 85 Pérdida de energía contracción gradual.....	150
Ecuación 86 Pérdida de energía en la expansión gradual.	151
Ecuación 87 Pérdida de energía total en reductores.	151
Ecuación 88 Pérdida de energía en la sección de visualización, laminación y filtrado.	152
Ecuación 89 Pérdida total del sistema.	152
Ecuación 90 Presión después de la bomba en el instante inicial de funcionamiento.	153
Ecuación 91 Carga dinámica total.	154
Ecuación 92 Carga de presión de vapor del líquido.....	156
Ecuación 93 Carga de presión estática.....	156
Ecuación 94 Presión absoluta.....	156
Ecuación 95 Presión absoluta (sistema expuesto a la atmósfera).....	156
Ecuación 96 Presión absoluta (sistema cerrado sin exposición a la atmósfera)..	156
Ecuación 97 NPSH disponible	157

GLOSARIO

AERONAVE: vehículo capaz de desplazarse por el aire o por el espacio.

AERONÁUTICA: La aeronáutica es la ciencia o disciplina cuyo ámbito es el estudio, diseño y manufactura de aparatos mecánicos capaces de elevarse en vuelo, así como el conjunto de las técnicas que permiten el control de aeronaves.

ANÁLISIS: separación de las partes de un todo hasta llegar a conocer sus principios y elementos.

VISUALIZACIÓN: es la generación de una imagen mental o una imagen real de algo abstracto o invisible.

FLUIDOS: se denomina fluido a un tipo de medio continuo formado por alguna sustancia entre cuyas moléculas hay una fuerza de atracción débil.

FLUJO: movimiento de un fluido por un lugar.

BOMBA CENTRÍFUGA: son siempre rotativas y son un tipo de bomba hidráulica que transforma la energía mecánica de un impulsor.

HIDRODINÁMICA: la hidrodinámica estudia la dinámica de fluidos no compresibles. Por extensión, dinámica de fluidos.

FLUJO LAMINAR: es un flujo lento y uniforme.

FLUJO TURBULENTO: es un flujo rápido y caótico.

PMMA O ACRÍLICO: la lámina de acrílico se obtiene de la polimerización del metacrilato de metilo y la presentación más frecuente que se encuentra en la industria del plástico es en gránulos ('pellas' en castellano; 'pellets' en inglés) o en láminas.

PRESIÓN: es una magnitud física escalar que mide la fuerza en dirección perpendicular por unidad de superficie, y sirve para caracterizar cómo se aplica una determinada fuerza resultante sobre una superficie. $P = \frac{F}{A}$

TEMPERATURA: se define como una magnitud escalar relacionada con la energía interna de un sistema termodinámico, definida por el principio cero de la termodinámica.

TÚNEL AERODINÁMICO: es una herramienta de investigación desarrollada para ayudar en el estudio de los efectos del movimiento del aire alrededor de objetos sólidos.

TÚNEL HIDRODINÁMICO: es un banco de pruebas experimentales, donde objetos pueden ser sumergidos, y así tener una serie de resultados visibles.

VELOCIDAD: es una magnitud física de carácter vectorial que expresa la distancia recorrida por un objeto por unidad de tiempo.

FUERZA: es una magnitud física que mide la intensidad del intercambio de momento lineal entre dos partículas o sistemas de partículas. $F=A \cdot p$

COMPRESIBILIDAD: refiere al cambio de volumen (V) de una sustancia que está sujeta a un cambio de la presión que se ejerce sobre ella. $E = \frac{-\Delta p}{(\Delta V)/V}$

DENSIDAD: es la cantidad de masa por unidad de volumen de una sustancia.

$$\rho = \frac{m}{V}$$

PESO ESPECÍFICO: es la cantidad de peso por unidad de volumen de una sustancia. $\gamma = \frac{w}{V}$

VOLUMEN: es una magnitud escalar definida como el espacio ocupado por un objeto.

ÁREA: es una medida de la extensión de una superficie, expresada en unidades de medida denominadas Unidades de superficie.

VISCOSIDAD: propiedad de un fluido que ofrece resistencia al movimiento relativo de sus moléculas.

VISCOSIDAD CINEMÁTICA: la viscosidad cinemática es el cociente entre la viscosidad absoluta y la densidad. $\nu = \frac{\mu}{\rho}$

NUMERO DE REYNOLDS: Osborne Reynolds fue el primero en demostrar que un flujo laminar o turbulento puede ser predicho si se conoce la magnitud de un número adimensional, conocido ahora como numero de Reynolds. $N_R = \frac{D\rho}{\eta}$.

FLUIDO NEWTONIANO: fluido cuya viscosidad puede considerarse constante en el tiempo.

ECUACIÓN DE CONTINUIDAD: El método para calcular la velocidad de flujo de un fluido en un sistema de conductos cerrado depende del principio de continuidad. Se utiliza para relacionar la densidad del fluido, El área de flujo y la velocidad de flujo en dos secciones de un sistema en el que existe un flujo estable. Es válida para todos los fluidos ya sean gases o líquidos.

$$\rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2$$

FLUJO VOLUMÉTRICO: es el volumen de fluido que circula en una sección por unidad de tiempo. $Q = Av$.

FLUJO EN PESO: es el peso del fluido que circula en una sección por unidad de tiempo. $W = \gamma Av$, $W = \gamma Q$.

FLUJO MÁSICO: es la masa de fluido que circula en una sección por unidad de tiempo. $M = \rho Q$, $M = \rho Av$.

ECUACIÓN DE BERNOULLI: describe el comportamiento de un flujo laminar moviéndose a lo largo de una corriente de agua.

$$\left(\frac{p_1}{\gamma}\right) + (z_1) + \left(\frac{v_1^2}{2g}\right) = \left(\frac{p_2}{\gamma}\right) + (z_2) + \left(\frac{v_2^2}{2g}\right)$$

ENERGÍA POTENCIAL: Se relaciona con algún nivel de referencia, sin embargo puede definirse como la energía que un sistema tiene de forma interna, es decir lista para ser desarrollada, para realizar algún tipo de trabajo.

ENERGÍA CINÉTICA: es aquella en la que gracias al movimiento se desarrolla una energía.

ENERGÍA DE FLUJO: representa la cantidad de trabajo necesaria para suministrar movimiento a una sección de fluido que se encuentra contra presión.

TUBERÍA: es un conducto que cumple la función de transportar agua u otros fluidos.

ECUACIÓN DE DARCY: la fricción causada por la interacción entre el flujo y tuberías, es proporcional a la carga de velocidad del flujo y a la relación de la longitud y el diámetro de la corriente, la expresión matemática para este enunciado se le denomina la ecuación de Darcy. $h_L = f \left(\frac{L}{D}\right) \left(\frac{v^2}{2g}\right)$.

ECUACIÓN DE HAGEN-POISEUILLE: es la ley que permite determinar el flujo laminar estacionario de un líquido incompresible y uniformemente viscoso a través de un tubo cilíndrico de sección circular constante. $h_L = \frac{32\eta Lv}{\gamma D^2}$

RESUMEN

El diseño preliminar y conceptual de un túnel hidrodinámico es el conjunto de estudios hechos sobre el comportamiento de fluidos y algunos parámetros que influyen en la interacción del fluido con un objeto. Se realizaron análisis de pérdida y ganancia de energía y aplicación de la ecuación de continuidad al sistema en cada uno de sus componentes como tubería, válvulas, bomba, y materiales que forman las secciones principales del túnel (laminación, filtrado y visualización). Todo lo anterior basado en antiguos túneles hidrodinámicos ya hechos claro está que con variaciones que buscan garantizar un flujo laminar con análisis hechos por los autores de este proyecto de grado y que dan la oportunidad a que sea construido para bien de los investigadores, alumnos y la distinguida Fundación Universitaria Los Libertadores.

INTRODUCCIÓN

En Colombia existen grandes sueños, grandes esperanzas que con el tiempo se disipan por el hecho de que hay limitaciones en desarrollarlas, ya sea por cuestiones económicas o por cuestiones de credibilidad donde la comunidad está dada a obtener productos extranjeros. Por tal motivo en nuestra opinión como autores deben realizarse proyectos como el presente proyecto de grado ya que es un pequeño grano de arena para que jóvenes investigadores se interesen en desarrollar productos a base de experimentos e investigaciones. Un túnel de visualización ya sea hidrodinámico o aerodinámico permite como pieza fundamental en laboratorios aeronáuticos el desarrollo de nuevos diseños que se vean directamente relacionados con la aerodinámica y ayudan a buscar ese perfil perfecto para la aplicación aeronáutica, como también para cualquier otra área que sea objeto de investigación.

En el transcurso de este proyecto de grado encontrará los temas relacionados con sus respectivas definiciones para el desarrollo del túnel hidrodinámico. Primero encontrará algo de historia y utilización de los túneles para avanzar tecnológicamente en la aeronáutica y más adelante se desarrolló un paso a paso en el análisis, desarrollo, y diseño preliminar del túnel hidrodinámico. Además de señalar aspectos importantes de diseño como pérdidas de energía, cálculos para adquirir una bomba adecuada, y cómo obtener un flujo laminar en la sección de visualización. Estos son temas fundamentales para poder contar con un lugar de pruebas apropiado, el cual proveerá información fundamental para el desarrollo de otros proyectos.

Es grato aportar esta humilde investigación pero que contiene un gran criterio investigativo y explicativo para que nuevas generaciones comprendan los conceptos básicos que implican el desarrollo de un túnel hidrodinámico como también proyectos similares en el que se requiera el manejo de fluidos. Nos complace entonces presentar el siguiente desarrollo del proyecto.

OBJETIVOS.

Objetivo General.

Diseñar de forma conceptual y preliminar un túnel hidrodinámico en el cual puedan realizarse pruebas de flujo de agua interactuando con una probeta (objeto geométrico, perfiles, etc.), con una sección de visualización de comportamientos y fenómenos.

Objetivos Específicos.

Recopilar antecedentes e investigaciones hechas en túneles hidrodinámicos y aerodinámicos.

Adquirir información sobre conceptos que intervienen en un el desarrollo de sistemas hidráulicos.

Aplicar la ecuación de continuidad y energía para el desarrollo del túnel.

Analizar las pérdidas y ganancias de energía en los sistemas hidráulicos y aplicación al túnel hidrodinámico.

Obtener un diseño del sistema en el que se apliquen los resultados obtenidos de las ecuaciones de continuidad y energía.

Garantizar un flujo laminar en la sección de visualización.

1. ANTECEDENTES.

1.1. UN POCO DE HISTORIA DE LOS TÚNELES DE PRUEBAS

Según un artículo de la nasa “Wind Tunnel of NASA by Donald D. Baals and William R. Corliss¹”, mencionan que el primer túnel de viento para pruebas tuvo que haberse creado 30 años antes del vuelo en Kitty Hawk de los hermanos Wright. En el libro Introduction to flight, de John Anderson resaltan que el túnel de una forma indirecta fue mencionado por Leonardo da Vinci donde sugirió lo siguiente; “siendo que la acción del medio sobre un cuerpo es la misma sea que el cuerpo se mueva en un medio en reposo o si las partículas del medio afectan con la misma velocidad sobre el objeto en reposo, podemos considerar el cuerpo como si estuviera en reposo y ver con que fuerza podría empujar por el medio en movimiento.”

Por lo tanto las fuerzas que afectan aerodinámicamente al cuerpo se pueden medir ya sea porque el objeto se encuentra en movimiento o simulándolo, moviendo el ambiente sobre un objeto inmóvil. En sí esta es la base para la creación de túneles de pruebas.

Regresando al artículo de la Nasa podríamos relacionar que se referían a Francis Wenham de Greenwich Inglaterra -Ilustración 1-, ya que se le asigna haber diseñado y construido el primer túnel de viento en 1871.

Ilustración 1 Francis Herbert Wenham (1824, Kensington – 1908)



Fuente: http://en.wikipedia.org/wiki/Francis_Herbert_Wenham

¹ Tomada en línea [<http://www.hq.nasa.gov/pao/History/SP-440/contents.htm>]

Además Phillips al crear su túnel de pruebas logró demostrar la idea planteada por George Cayley quien dijo que una mayor curvatura en la superficie superior del perfil que de la inferior provocaría una reducción de presión y por lo tanto causar sustentación.



Patented 1884

No. 1 No. 2 No. 3 No. 4 No. 5 No. 6 No. 7 No. 8

a a

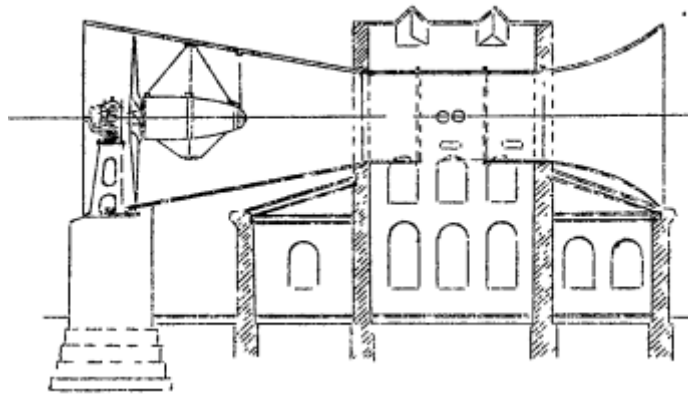


Otras fechas importantes para el desarrollo de túneles de prueba:

1891 Rusia Universidad de Moscú, desarrollado por Nikolai Joukowski. El profesor Joukowski construyó en 1915 con concreto reforzado un túnel donde este tenía un diámetro de 3mts y un motor eléctrico de 350hp, un fan de 6mts de diámetro, y una velocidad anticipada de 50m/s, el túnel fue construido en su totalidad pero el motor no pudo ser construido por causa de la guerra.

Se resalta en el documento “technical memorándums National Advisory Comitee For Aeronautics No 386” el hecho de implementar ideas innovadoras en la geometría de los conos. Estas ideas las explica el profesor en su artículo “Collectures et Diffuseurs des Buses pour Soufflerics Aerodynamiques” publicado en “Travaux du Bureau des Calculs et Essais Aeronautiques de L’École Supérieure Technique de Moscou, No. 6, 1918”).

Ilustración 4 Túnel de viento de Joukowski



Fuente: “L’Aéronautique”. Instituto Central aerodinámico de Moscú. Rusia

- 1893 Austria, túnel desarrollado por Ludwig Mach, hijo de Ernst Mach.
- 1896 U.S.A. MIT, Instituto de tecnología de Massachusetts, primer túnel desarrollado en Estados Unidos por Alfred J. Wells.

Estos túneles dieron cabida a muchas revoluciones dentro del ámbito de la mecánica y tecnología, motivo que hace resaltar la creación de la turbina hidráulica ya que es un mecanismo que funciona a base de un fluido que en este caso es el agua lo que hace posible un pensamiento considerable en la transferencia de movimiento de este líquido con respecto al funcionamiento de nuevos implementos³.

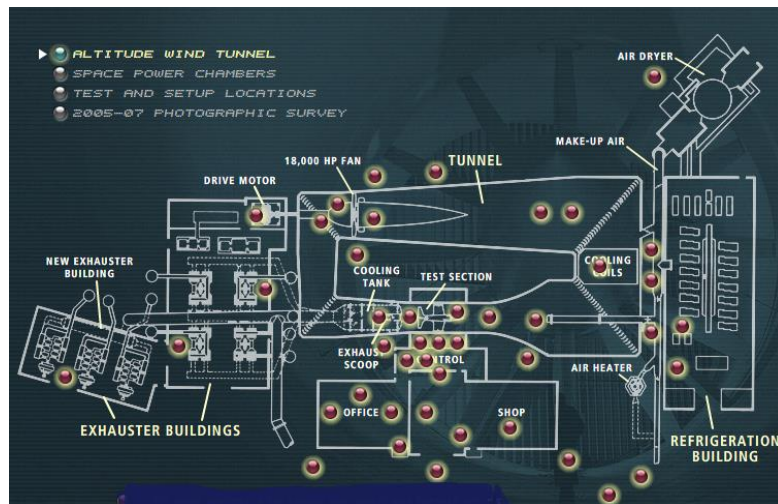
³ Información tomada del memorando técnico de la NASA 89409. (ver referencia 2).

Al ver este tipo de situaciones llega la mecánica de fluidos que nace con Ludwig Prandtl, quien en 1904 elaboró la síntesis entre la hidráulica práctica y la hidrodinámica teórica al introducir la teoría de capa límite.

1.2. TÚNEL DE VIENTO PARA SIMULACIÓN EN ALTITUD, Y CÁMARAS DE POTENCIA ESPACIAL

El (AWT) por sus siglas en inglés “altitude wind tunnel” es capaz de soportar un motor de aeronave a escala completa donde este simula las condiciones de vuelo a diferentes alturas. El AWT fue el primer túnel de viento en Estados Unidos y posiblemente del mundo con esta capacidad.

Ilustración 5 Túnel de viento con altitud simulada.



Fuente: Tomada de la presentación interactiva del Glenn Research Center.

Este jugó un importante rol desde la época de 1844 a 1958 donde gracias a las pruebas que se realizaban se desarrollaron mejoras en los motores turbojet, ramjet, y turboprop, además de resolver una variedad de problemas mayores que se encontraban en el bombardero B-29 -Ilustración 6-durante la Segunda Guerra Mundial, sin embargo se adicionó un gran túnel de viento supersónico lo que ocasionó que el AWT no se necesitara con la misma frecuencia.

Ilustración 6 B-29.



Fuente: Tomado de la cinta de dominio público filmada para la segunda guerra mundial NASA TM 89409.

La reducción en su uso también coincidió con el programa espacial en 1959 varios de los componentes fueron removidos para poder realizar pruebas del Proyecto Mercury, pero tristemente este ya no fue utilizado como túnel de viento de nuevo.

En 1961 las instalaciones fueron convertidas en 2 grandes cámaras de succión y renombradas como SPC por sus siglas en inglés “Space Power Chamber”. Los remanentes fueron removidos y algunas paredes fueron insertadas para dividir la cámara en dos. Una fue usada para recrear un ambiente espacial y se utilizó para calificar en tamaño real. La segunda cámara fue usada para recrear ambientes de hasta 100,000 pies (30,480mts). Durante sus 30 años de operación las instalaciones fueron testigos de la continua evolución aeronáutica y espacial como fue el progreso desde motores recíprocos hasta motores jet. Las instalaciones fueron demolidas en el 2008 dado a sus altos costos de mantenimiento y temas concernientes al medio ambiente.

Ilustración 7 Drive Fan, Sección sur



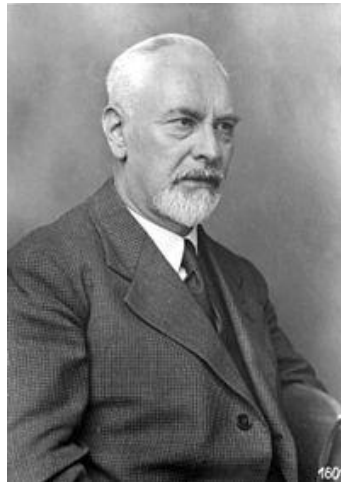
Fuente: <http://awt.grc.nasa.gov/galleries/detail.np/detail-38.html>

La Ilustración 7 muestra el gran tamaño del fan -31 pies de diámetro- el eje del motor se extendía a lo largo del túnel con un fan de 12 aspas de madera píceas, y era alimentado por un motor de 18000 hp².

1.3. TÚNEL DE AGUA A LO LARGO DE LA HISTORIA

Ludwig Prandtl (Freising, 4 de febrero de 1875 – †Gotinga, 15 de agosto de 1953) fue un físico alemán, quien realizó importantes trabajos pioneros en el campo de la aerodinámica, y durante la década de 1920 desarrolló la base matemática que da sustento a los principios fundamentales de la aerodinámica subsónica. En sus estudios identificó la capa límite, y elaboró la teoría de la línea sustentadora para alas esbeltas. El número de Prandtl, que desempeña un importante papel en el análisis de problemas de fluidos ha sido nombrado en su honor⁴.

Ilustración 8 Ludwig Prandtl.



Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Ludwig_Prandtl.

Los vehículos se han desarrollado de una forma satisfactoria en la relación de la aplicación de la aerodinámica y la hidrodinámica sin embargo para la comprensión de estas configuraciones se debe saber una serie de condiciones de diseño. Las instalaciones de agua como túneles canales y tanques proveen información de alto valor a las cuales se aplica la mecánica de fluidos fundamental de dos y tres dimensiones, usualmente estas operan a bajas velocidades.

⁴ http://es.wikipedia.org/wiki/Ludwig_Prandtl.

La aplicación de instalaciones hidrodinámicas para las investigaciones aerodinámicas fue implementada por el pionero LUDWIG PRANTL (véase Ilustración 8) en el comienzo del vuelo como lo conocemos hoy en día. La llegada de aeronaves de alto rendimiento que incorporan la separación de flujo por diseño hace que se promueva el interés en el desarrollo de laboratorios hidrodinámicos como una herramienta de diagnóstico. Los resultados de estos laboratorios han ayudado a desarrollar diseños interesantes y complejos para vehículos de generaciones futuras donde la aerodinámica y la hidrodinámica juegan un papel importante. En general el uso de las instalaciones hidrodinámicas han madurado en proporción directa a los avances tecnológicos en vehículos aéreos, terrestres y marinos, esto tiene como consecuencia que estas instalaciones hídras sean elementos importantes para la investigación, desarrollo de mecanismos y estructuras que interactúan con vórtices en fluidos.

La visualización del fenómeno de flujo representa un gran avance hacia la comprensión como también al control del fluido, es decir, la visualización del flujo nos permite encontrar mecanismos que ayuden en el rendimiento de nuevo vehículos como también solucionar problemas aerodinámicos e hidrodinámicos ya existentes. La selección del agua como medio para la visualización del flujo se basa en gran manera al incremento de densidad en relación con el aire por lo tanto tiene excelentes características de reflexión de luz las cuales pueden ser “inyectadas” en el campo del flujo, como también el uso tintas las cuales tienen un comportamiento semejante al agua por lo tanto se puede visualizar los resultados de la interacción entre el objeto y el fluido.

A la misma escala y velocidad el número Reynolds es 15 veces mayor en el agua que en el aire sin embargo costos, complejidad y el espacio en las instalaciones son factores que limitan el tamaño de la sección de prueba lo que hace que el modelo sea usualmente a una escala más pequeña. En adición a esto las velocidades del fluido son típicamente menores que 10 ft/s para así mantener con claridad la estructura del flujo y evitar cargas excesivas y cavitación. La combinación de modelos a menor escala y velocidades bajas tienen como resultado que su número Reynolds sea de menor magnitud que esos que se alcanzan en modelos de mayor escala. Como consecuencia de esta mezcla de números de Reynolds, el fluido en movimiento debe estar considerado en la clase en la cual son insensibles a los cambios, al menos la estructura fundamental del fluido debe ser similar sin importar su número Reynolds. Es una fortuna poder visualizar fenómenos tan complejos de flujo particularmente en movimientos 3D con vórtices o regímenes predominantemente separados y usualmente asociados con vehículos de alta tecnología los cuales se prestan para evaluaciones cualitativas y a veces cuantitativas².

1.4. CRONOLOGÍA DE LA IMPORTANCIA DEL AGUA COMO MEDIO PARA EL DESARROLLO DE TECNOLOGÍAS

Clifford Truesdell nació en 1919 en Los Ángeles, California, Estados Unidos. Estudió matemáticas y física en Caltech donde se graduó en 1941. Obtuvo su doctorado en matemáticas en 1943 en Universidad de Princeton. Durante unos años realizó investigaciones en mecánica para la Marina de los Estados Unidos. Dictó clases en la Universidad de Indiana entre 1950 y 1961, y luego profesor de mecánica racional en la Universidad Johns Hopkins de Baltimore, hasta su retiro en 1989. Junto con Walter Noll realizaron contribuciones fundacionales a la mecánica de los medios continuos. También fue un importante historiador de la ciencia y las matemáticas. Editó (solo o en colaboración) seis volúmenes de las obras completas de Leonhard Euler⁵.

Ilustración 9 Clifford Truesdell.



Fuente: <http://www.fotosimagenes.org/clifford-truesdell>

Se puede hablar que más de 2000 años atrás en los escritos de Aristóteles (384 – 322 A.C.) describe observaciones de remolinos en el mar y las pérdidas resultantes de barcos atrapados en este potente fluido en movimiento.

Bon Karman escribió sobre una pintura antigua de Bolonia – Italia sobre San Cristóbal caminando a través de una corriente de fluido que mostraba vórtices detrás de él o como lo denominó Karman calles de vórtices. En los siguientes siglos observaciones no científicas de flujos en agua persistieron. Las más antiguas documentaciones en mecanismos de flujo en agua para propósitos científicos aparecen en los escritos y dibujos elaborados de Leonardo Da Vinci (1452 – 1519 D.C.), donde sus descripciones de la naturaleza resaltaban un fenómeno particular tal como los vórtices de un flujo global y que por lo tanto tienen en común con experimentos científicos.

⁵Tomado en línea [http://es.wikipedia.org/wiki/Clifford_Truesdell#Biograf.C3.ADa]

Leonardo da Vinci (Leonardo di ser Piero da Vinci) fue un pintor florentino. Notable polímata del Renacimiento italiano (a la vez anatomista, arquitecto, artista, botánico, científico, escritor, escultor, filósofo, ingeniero, inventor, músico, poeta y urbanista) nació en Vinci el 15 de abril de 1452 y falleció en Amboise el 2 de mayo de 1519, a los 67 años, acompañado de su fiel Francesco Melzi, a quien legó sus proyectos, diseños y pinturas.² Tras pasar su infancia en su ciudad natal, Leonardo estudió con el célebre pintor florentino Andrea de Verrocchio. Sus primeros trabajos de importancia fueron creados en Milán al servicio del duque Ludovico Sforza. Trabajó a continuación en Roma, Bolonia y Venecia, y pasó los últimos años de su vida en Francia, por invitación del rey Francisco I⁶.

Ilustración 10 Leonardo Da Vinci 1512



Fuente: <http://www.dailyartfixx.com/2011/04/15/leonardo-da-vinci-1452-1519/>.

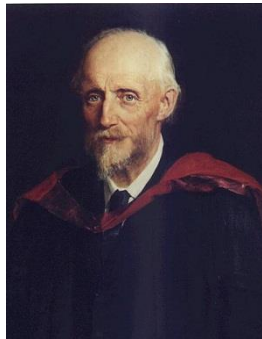
Leonardo frecuentemente habló sobre las similitudes del movimiento de los fluidos tanto del agua como del aire. De acuerdo a Truesdell (véase Ilustración 9) **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** tal conclusión solo puede haberse dado bajo una observación directa de ambos fluidos en movimiento, de hecho Leonardo fue el primero de hablar del agua y del aire como fluidos, incluso diseñó el primer túnel de agua como una instalación para la visualización de flujo. Leonardo también reconoció las limitaciones de las simulaciones del aire en el agua dados a los efectos de compresión².

⁶Tomado en línea [http://es.wikipedia.org/wiki/Leonardo_da_Vinci]

1.4.1. De 1600 a 1800. Un siglo después de la muerte de Leonardo el señor Isaac Newton (1642 – 1727) dijo que su llamada “ley del cuadrado – seno de la resistencia del aire” aplica también para el agua donde las fuerzas son proporcionales a las respectivas densidades incluso en el documento de Newton promovió la aplicación de resultados experimentales en agua al movimiento del aire y viceversa. Hay una influencia de Newton en el experimento de Edme Mariotte (1620 – 1684) quien midió la fuerza que actúa en una placa plana sumergida en una corriente de agua, Jean Charles De Borda (1733 – 1799) realizó experimentos en instalaciones de agua usando cuerpos de varias formas, que fueron puestos en movimiento por medio de un brazo rotante².

1.4.2. De 1800 a 1900. Osborne Reynolds (Belfast, Irlanda del Norte, 23 de agosto de 1842 - Watchet, Inglaterra, 21 de febrero de 1912), fue un ingeniero y físico irlandés que realizó importantes contribuciones en los campos de la hidrodinámica y la dinámica de fluidos, siendo la más notable la introducción del Número de Reynolds en 1883⁷.

Ilustración 11 Osborne Reynolds.



Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Osborne_Reynolds

Experimentos esporádicos usando agua como medio de trabajo continuaron en el siglo 19. En 1839 Hagen dirigió estudios del agua a través de tubos cilíndricos donde observó la transición del flujo laminar a turbulento incluso condujo unas pruebas detalladas de flujo estable en tubos documentando resultados en 1854.

En 1883 Osborne Reynolds-Ilustración 11-condujo sus experimentos clásicos en los cuales demostraba que la transición de flujo ocurría cuando un parámetro que ahora llamamos el numero Reynolds excede un cierto valor. Sus resultados fueron documentados por una serie de figuras o dibujos y no con fotografías. Una nota interesante es que los experimentos de Reynolds se repitieron aproximadamente

⁷Tomado en línea [http://es.wikipedia.org/wiki/Leonardo_da_Vinci]

100 años después en su dispositivo original en la ciudad de Manchester y los resultados fueron documentados por Van Dyke⁸. En 1897 Hele Shaw realizó experimentos en un tanque delgado para estudios 2D en fluidos altamente viscosos. Los experimentos de investigadores han cubierto 4 siglos desde el trabajo de Leonardo el cual contribuyó al desarrollo de una nueva instalación para la visualización de flujos como también técnicas que llevaron a avances en la mecánica de fluidos².

1.4.3. De 1900 a 1935. Las instalaciones en las cuales se utilizan laboratorios de agua como herramientas para el estudio de un amplio rango de conceptos fundamentales tanto aerodinámicos como hidrodinámicos fueron iniciadas por Ludwig Prandtl en Alemania a comienzos de 1900. Uno de sus experimentos característicos fue realizar estudios 2D en canales de agua donde el flujo era visualizado en la superficie libre usando polvo de aluminio. Su primer documento señalando su método de visualización se realizó en 1904². Una compilación de los estudios realizados por Prandtl en 1934:

- La propagación de turbulencia en capa límite.
- Desprendimiento de vórtices de una placa.
- Desarrollo de vórtices detrás de un cilindro no rotante y el desarrollo de vórtices Karman.
- Capas límites, laminares y turbulentas.
- Desarrollo de flujo alrededor de un cilindro flotante.
- Comienzo de vórtices generados por un perfil alar.
- Flujo en un difusor con y sin succión en las paredes.
- Fenómeno de cavitación.

Karl Hiemenz quien fue un estudiante de Prandtl construyó un canal en 1911 para observar la separación de un flujo detrás de un cilindro encontrando una separación de vórtices oscilatoria donde lo observado era algo inesperado y fue atribuido al modelo del túnel y a su asimetría de las paredes. El anterior fenómeno llevo a Karman a realizar estudios y a calcular la estabilidad para sistemas de vórtices el cual los llevo a la comprensión del ahora famoso “calle vórtice”⁹.

⁸Van Dyke. M., An Album of Fluid Motion, Stanford, Calif., The Parabolic Press, 1982.

⁹(Fundación Wikimedia, 2013)

1.4.4. De 1935 a 1950. Las contribuciones que los laboratorios hidrodinámicos aportaron para los nuevos diseños se incrementaron en 1935 a 1950, y en gran parte se debe al ambiente político de la época que más adelante llevó a la segunda guerra mundial, acarreando cubrir la necesidad de superioridad de los militares aéreos y marítimos.

En esta época donde la industria buscaba mejorar el diseño de las palas de motores y aeronaves jet, Reichardt H¹⁰. Describió los resultados de pruebas hidrodinámicas para desarrollar nuevas formas geométricas usando el método de cavitación. La base de este estudio es la similitud de los flujos gaseosos en velocidades sónicas a los fluidos en movimiento en cavitación. Los modelos usados se ubicaron en la sección de prueba de forma que se alineara con la corriente, y por lo tanto las geometrías adquiridas arrojaron resultados aproximados de las geometrías que se podrían usar en el aire donde la aparición de flujo sónico se ve retrasada en la superficie.

Los alemanes también usaron laboratorios hídricos para ayudar a mejorar y desarrollar vehículos marinos. Un gran avance en el submarino tipo XXI se desarrolló en parte de investigaciones en un tanque dando como resultados un cascaron de forma continua, una torre cónica y unas armas integradas en la torre. Los países aliados también usaron laboratorios hidrodinámicos durante la Segunda Guerra Mundial para mejorar vehículos aéreos y marinos, varios de estos laboratorios se encuentran en Inglaterra como el Laboratorio de Física Nacional (NPL) y el Laboratorio de Investigación Almirante (ARL), por el lado de Estados Unidos también se encuentran varios laboratorios utilizados en ésta época como el Instituto de Tecnología de California (Caltech), Comité de Consejo Nacional para la aeronáutica (NACA) y el Modelo Cuenca de David Taylor. La mayoría de pruebas realizadas en estos laboratorios pertinentes a ésta época se realizaron a vehículos marinos para secciones como aspas, perfiles hidrodinámicos, timones navales, planos submarinos, entre otros.

Un estudio paramétrico de la separación de flujo en proyectiles con cuerpos fuselados y figuras esbeltas que resaltan en la parte anterior y posterior de estos se realizó en 1944 por Knapp¹¹ en el túnel de agua de alta velocidad del Instituto Tecnológico de California. Las observaciones detalladas de estas pruebas eran con el objetivo de ayudar a los diseñadores de proyectiles y bombas durante las últimas etapas de la guerra. En aquel momento las alas o planos aún eran casi

¹⁰Reichardt, H.. "On the Determination of Favorable Shapes of Bodies for High Speed by Cavitation Tests," Gottingen, Germany. M. A. P. Volkenrode, MAP-VG88-49T. 1946.

¹¹Knapp, R. T., "Flow Diagrams of Projectile Components." CalTech Report, O. 5. R. &D., National Defense Research Committee. Div. Six-Section 6.1. 1944.

rectas y con una alta razón de aspecto, como consecuencia los perfiles aerodinámicos eran generalmente probados y los resultados obtenidos en 3D permitían corregirlos.

Con los anteriores procedimientos y pruebas se encontró un problema general, y es la adecuación de resultados con modelos a escala menor a aquellos con escala real donde obviamente los número Reynolds son mucho menores en escalas pequeñas que en aquellos a escala real, usualmente esto lo trataban de resolver con la inclusión del número Froude, sin embargo también se buscó otras medidas como el aumentar la temperatura del agua para incrementar el número Reynolds, pero se enfrentaron con problemas de cavitación ante la llegada de aeronaves jet, donde debían aumentar la velocidad del fluido por lo tanto se destinó que estos laboratorios fueran exclusivamente para diseño².

1.4.5. De 1950 a 1960. Durante la segunda guerra Mundial investigadores Alemanes y Estadounidenses llegaron a encontrar una forma de resolver los efectos de flujo Transónicos rediseñando los planos alares y dando un ángulo “sweep” o de barrido los cuales retrasan los efectos Transónicos.

En condiciones de diseño las líneas de separación de barrido y los vórtices resultantes eran importantes características del campo de flujo en 3D. En la entrada de los años 50's se marcó de gran manera la llegada de los vuelos supersónicos los cuales caracterizaron una alas delgadas y su vez esbeltas en área. Gracias a los diseños las configuraciones utilizaban a su favor los vórtices resultantes del borde de ataque para así mejorar el despegue y aterrizaje.

La complejidad en el campo de los vórtices creados por el ala y la no linealidad aerodinámica asociada fue demostrada por varios investigadores tanto ingleses, franceses, estadounidenses, canadienses y suecos, en los finales de los 40's y comienzos de los 50's. Estas investigaciones resaltaron la necesidad de una herramienta de visualización para poder comprender y controlar el flujo de fluidos, incluso resultados dejaron ver que una vez la separación del flujo ocurre a lo largo del borde de ataque de un ala con ángulo de barrido, el carácter fundamental del vórtice es prácticamente el mismo sin que el número Reynolds influya en la estructura de este así el número Reynolds varíe, por lo tanto así el número mach cambie en un amplio rango el vórtice se presenta de la misma forma, de esta manera encontraron que el ángulo de barrido del ala debe hacerse de tal forma que los vórtices producidos no interfieran o interactúen con la onda de choque cónica. Por lo tanto una nueva era de aplicaciones para los laboratorios hidrodinámicos en cuestión de diseño emergió ayudando a desarrollar vehículos militares y comerciales con operaciones supersónicas.²

1.4.6. DE 1960 a 1970. En los 60's numerosas configuraciones de aeronaves con alas esbeltas, delgadas y modernas emergieron donde caracterizaban el hecho de que la formación de vórtices del borde de ataque se realiza en condiciones fuera de diseño, como las aeronaves F111 -Ilustración 12-, YF-12 y el XB-70, por el lado de USA, y Mirage III y IV, en Francia, el HP-115 una aeronave experimental de Inglaterra,- El Concorde- de diseño en conjunto por Inglaterra y Francia. En adición a esto el trabajo de diseño en los 70's, culminó en las aeronaves F-16 y F-18 protagonistas de esta época además de que en el diseño no solo por sus alas sino también de fuselaje el cual posee unos "strakes" los cuales proporcionan vórtices concentrados con el fin de aumentar la sustentación en el despegue y en el aterrizaje, como también en maniobras velocidades subsónicas y transónicas.

Ilustración 12 prototipos con doble configuración de alas



Fuente: http://www.aircraftinformation.info/gallery_bombers_historic.html.

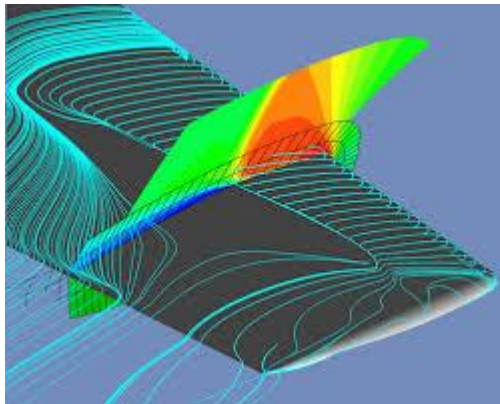
Se siguieron realizando varias pruebas para estudiar profundamente el efecto de los vórtices en alas esbeltas, incluso se construyó una copia del túnel de NPL en la Universidad de Southampton en Inglaterra, donde se hicieron pruebas tanto estáticas como dinámicas de alas esbeltas.

Werlé¹² obtuvo excelentes correlaciones en el laboratorio ONERA del comportamiento de los vórtices en alas delta y aeronaves específicas como el Concorde y el Douglas F-50 en el túnel de agua y de viento. Estos resultados establecieron ciertos parámetros de confiabilidad, para el caso especial de vórtices de borde de ataque en alas delgadas con superficies con alto ángulo de barrido donde se ratifica que los laboratorios hidrodinámicos son una herramienta en la que se puede obviar la diferencia del número Reynolds. ONERA ensambló un laboratorio donde consistía en dos secciones de túneles verticales y un tanque de agua los cuales se dedicaron en el estudio aerodinámico e hidrodinámico del fenómeno de flujo.

¹²Werlé, H..."Hydrodynamic Flow Visualization," Ann. Rev. Fluid Mech. Vn.5 . . .1973, pp. 361482.

Los franceses se encontraban al frente de la tecnología de la visualización de flujo y ellos aplicaron laboratorios acuáticos a una gran cantidad de situaciones aerodinámicas. Estas incluían capas límite tanto para flujo turbulento como laminar, separación de capa límite, separación en figuras 2D y 3D, vórtices dominados en fuselajes y alas esbeltas, control en capa límite bajo soplado, mejoramiento de vórtices en envergaduras variables, efecto tierra en el Concorde usando una plataforma móvil, modelos con movimientos internos como entradas de aire del motor y el rotor de un helicóptero en traslación y sobrevuelo. El laboratorio ONERA llegó a ser la excelencia en visualización de flujo y el antecesor a muchos laboratorios acuáticos alrededor del mundo².

Ilustración 13 Ala OERA M6 simulación numérica.



Fuente: <http://www.onera.fr/en/actualites/image-du-mois/onera-m6-wing-star-cfd>

El túnel de agua de la NAE fue una ayuda consistente, en información sobre la complejidad del fenómeno de flujo en los años 60's en los cuales sus investigaciones resaltaron ciertos aspectos específicos como:

- El concepto de control de circulación para objetos aerodinámicos de alta sustentación fue estudiado para;
 - Perfiles redondeados.
 - Flaps, sustentadores.
- Elementos parte del fuselaje.
- Sustentación en palas con alto ángulo de inclinación.
- Ventiladores en conductos.
- Arreglos en motores de aspas en alas.

Las investigaciones de alas sumergidas con motores y sustentación eran indicios de un incremento en sofisticación en experimentos en instalaciones acuáticas además de la valiosa información obtenido por estos estudios.

Aeronaves de transporte pesado tanto comercial como militar, que aparecieron en este periodo generaban grandes vórtices los cuales resultaban ser peligrosos para las aeronaves siguientes. Por lo tanto la NASA (National Aeronautics and Space Administration), la compañía de aeronaves Douglas, y la compañía Lockheed-Georgia, en los Estados Unidos, emplearon laboratorios hidrodinámicos para tal propósito. La NAE realizó experimentos en vórtices resultantes de fuselajes con geometrías en su parte trasera ascendentes similares a las aeronaves de carga trasera donde se encontró que los vórtices causaban efectos adversos en la estabilidad y arrastre en crucero además de una indeseable carga en las puertas de carga traseras².

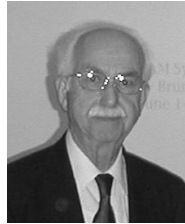
Ilustración 14 CASA 212-200



Fuente: <http://www.airport-data.com/aircraft/photo/000475463.html>

1.4.7. De 1970 a 1980. Una vez más los diseñadores enfrentaban un nuevo objetivo a alcanzar pues se encontraba un gran espacio vacío de información en cuanto a misiles avanzados tácticos se refiere, además de la configuración adecuada para controlar aeronaves en alturas extremas, los vórtices dominados derivados de los fuselajes y alas esbeltas con alta maniobrabilidad no eran muy bien comprendidos. Las técnicas de visualización y de medición en túneles de viento y en vuelo era inadecuadas para el gran detalle 3D que generan las características de los vórtices. Tales vórtices tienen un desarrollo los cuales hay que tener en cuenta como sus interacciones y rompimientos. Por lo tanto en 1970 el uso de túneles de agua y laboratorios acuáticos surgió de forma significativa².

Ilustración 15 Dr. Turgut Sarpkaya¹³ PhD 1954 en Mecánica e Hidráulica.



Fuente: <http://www.engineering.uiowa.edu/alumni-friends/honor-wall/distinguished-engineering-alumni-academy-members/dr-turgut-sarpkaya>

Para mejorar la comprensión de la estructura del rompimiento del núcleo de los vórtices el Dr. Sarpkaya (Ilustración 15) condujo una serie de experimentos en los Estados Unidos usando instalaciones acuáticas donde en sus experimentos buscó la forma de producir vórtices en el agua por medio de guías físicas y venas o aspas para direccionar el flujo y luego pasando por un tubo divergente creando así la formación de vórtices. Los resultados experimentales también dieron soporte al desarrollo de métodos computacionales para predecir inestabilidades en el núcleo de los vórtices¹⁵.

En esta época los laboratorios usando el agua como medio se veían alrededor del mundo para el diseño y desarrollo de vehículos tanto aéreos como marítimos y terrestres, algunos de los países con esta tecnología eran:

- Estados Unidos. - Canadá.
- Francia. - Inglaterra.
- Bélgica. - Alemania.
- Suiza. - Holanda.
- Rusia. - Australia.
- Japón. - China.

La corporación Northrop en Estados Unidos era el líder en la aplicación de túneles de agua para la simulación de aeronaves de combate con altos ángulos de ataque -esto ayudo a mejorar el proceso de diseño de aeronaves-. Una aplicación de las cuales dieron paso a otro tipo de experimentos fue modelar un túnel más pequeño pero hecho en similitud al de ONERA que es una unidad de descarga gravitacional

¹³ Sarpkaya. T., "On Stationary and Traveling Vortex Breakdowns," J. F l u i d Mech., Vol. 45, Pt. 3, 1971, pp 549-559

el cual permite la visualización de vórtices LEX (leading edge – extensions) en modelos a escala más pequeños como el Northrop YF17 con una configuración de combate.

Con una alta definición se vieron los resultados en la interacción del flujo con el modelo YF17 lo que dio paso a la estimulación de crear un nuevo túnel agua pero a una configuración más grande que se encuentra en uso hoy en día. Un ejemplo de nuevos túneles de agua se ve en la Ilustración 16.

Ilustración 16 Túnel de agua.



Fuente: Tomada del centro de investigación Rolling Hills. <<http://www.rollinghillsresearch.com/>>

Esta unidad fue usada de forma extensa en todos los programas militares aeronáuticos con la finalidad de comprender y controlar el flujo de los vórtices resultantes del fuselaje y alas, interacción de vórtices y rompimiento, y la interacción de vórtice con el empenaje. Prácticamente todas las aeronaves militares de combate que se encuentran en el inventario de Estados Unidos e incluso muchas otras configuraciones militares extranjeras fueron probadas en estos laboratorios, la finalidad de este túnel rápidamente se expandió para incluir los siguientes estudios:

- Estudio en 2D de los efectos del escape sobre el fuselaje y la separación del flujo.
- Escape de motor.
- Procesos de mezcla jet.
- Control de vórtices de ala y fuselaje por medio de controles activos y pasivos.
- Fenómeno de re-ingestión de (hot – gas) sobre V/STOL en las proximidades a tierra.
- Manejo del flujo de vórtices para entradas de motores la cual se mejoró su desempeño.

- Trayectorias de empuje reversible y los efectos sobre el ala y la cola.
- La estructura de las turbulencias.
- Oscilaciones laterales inducidas.
- Efectos sobre la estabilidad al deflejar los flaps del ala tanto en su borde de ataque como en su borde de salida.
- Superficies de control de oscilación del ala para controlar el flujo.
- Alas tipo canard.
- Alas con barrido hacia adelante.
- Campos de flujo en alas oblicuas.

Interés en la inestabilidad de la aerodinámica de las aspas de los rotores de los helicópteros llevaron a un gran número de investigaciones en el comportamiento de pérdida dinámica de perfiles oscilantes, estas investigaciones se realizaron en el laboratorio de tecnología e investigación del ejército de Estados Unidos y en el centro de investigaciones AMES de la NASA. Una característica especial de los experimentos en el túnel de agua fue el de medir la fuerza y el momento en combinación con la visualización de alta definición del flujo en el cuerpo de la aeronave.

El gran interés continuó para aeronaves V/STOL la cual llevó al desarrollo de más laboratorios acuáticos en el Rockwell International y la compañía McDonnell – Douglas, estos laboratorios fueron dedicados para la visualización del fenómeno de efecto tierra asociado con arreglos multijet. La fuerza aérea de Estados Unidos construyó en sus laboratorios un túnel de agua pequeño el cual operaba por descarga gravitacional estas instalaciones probaron ser muy útiles en la visualización del flujo de vórtices en modelos de combate avanzados incluyendo varias configuraciones de ala con barrido hacia adelante.

Las instalaciones de agua también experimentaron un renacimiento en el gobierno europeo, industria, y comunidades universitarias. Un túnel de agua construido en Messerschmitt-Bölkow-Blohm (MBB) en Múnich – Alemania se convirtió en una ayuda útil en el reconocimiento y solución de problemas de flujo durante el desarrollo de aeronaves. La universidad Stuttgart que tiene una gran historia y experiencia en el uso de instalaciones acuáticas que datan desde los años 50 continuó su investigación en la parte fundamental de mecánica de fluidos.

El comportamiento de misiles esbeltos fueron estudiados para el resultado de sus vórtices en situaciones extremas, estas fueron investigadas en el túnel de agua que se encuentra en la división de aeronaves militares y aeroespaciales británicas. Un estudio de la sensibilidad del número Reynolds para vórtices de alas tipo delta fue realizado en un túnel de agua Svenska Aeroplan Aktiebolaget (SAAB) en Suecia. Estudios de flujo de vórtice tipo `Lex` se realizaron en las instalaciones acuáticas del instituto Von Karman en Bélgica².

1.4.8. De 1980 al presente. Las instalaciones de agua han ganado aceptación general en todo el mundo como valiosas herramientas de diagnóstico para la ayudar en el proceso de diseño de vehículos. La capacidad única de estas instalaciones para visualizar vórtices en 3D sobre complicadas formas aerodinámicas e hidrodinámicas ha sido el desarrollo utilizado en vehículos en los programas de varios países. Los flujos de vórtices se han convertido en una "forma de vida" en todas las clases de vehículos. El énfasis en los vehículos de vuelo de baja observación ha dado lugar a formas aerodinámicas que están dominados por los flujos de vórtices.

Claramente el conocimiento en el control de estos regímenes separados en 3-D es un elemento importante en el aire, la tierra, y la optimización del rendimiento del vehículo marítimo. La sofisticación de las instalaciones de agua, la visualización de flujo y técnicas de medición se ha incrementado de manera concertada con el avance de la tecnología de los vehículos, además de la información cualitativa obtenida a partir de experimentos de flujo de agua. Los esfuerzos están en marcha para extraer más datos cuantitativos que era posible anteriormente según lo indicado por *Gad-el-Hak*¹⁴. Con la llegada de los computadores avanzados capaces de manipular imágenes de alta resolución ha hecho posible la combinación de flujo-visualización e imagen-digital procesando técnicas de procesamiento para obtener información cuantitativa. Los láseres se han convertido en un elemento clave en muchas instalaciones de agua de los laboratorios. Una información cuantitativa de los flujos de campo se obtuvo en los últimos experimentos de flujo de agua de movimientos con vórtices utilizando el velocímetro láser de 2-D.

Las instalaciones de agua "standard bearers" de la década de 1970 siguen haciendo importantes contribuciones en esta década a la comprensión y el control del flujo alrededor de vehículos avanzados. En los últimos años el énfasis de Northrop ha sido colocado en el establecimiento de una base de datos de visualización de flujo en configuraciones de generaciones actuales y futuras de

¹⁴Biografía en [<http://www.people.vcu.edu/~gadelhak/Bio.pdf>]

aviones de combate que se caracterizan por su alto acoplamiento de fuselaje y sistemas de ala vórtice en posiciones extremas de aptitudes. ONERA en Francia y la NAE en Canadá siguen una larga tradición de excelencia en aplicaciones de instalaciones de agua al aire para el diseño de vehículos marinos.

Varias instalaciones de laboratorios de agua en los Estados Unidos han asumido posiciones de liderazgo en la investigación hidrodinámica aeronáutica en los últimos años. El túnel de agua en la NASA Ames Research Facility Dryden Flight siguiendo el modelo del túnel de Northrop se ha convertido en un "caballo de trabajo" para la NASA desde su creación en la década de 1980.

Otras organizaciones han adquirido recientemente túneles de agua. NASA'S Langley Research Center construyó una instalación con una sección de prueba vertical similar a el túnel NASA Ames-Dryden y está poniendo en marcha una serie de proyectos de apoyo a sus programas de investigación aeronáutica. El éxito del túnel piloto en agua AFWAL en Wright-Patterson Air Force Base ha llevado a la instalación de un túnel de agua más grande de tipo ONERA. Este túnel tuvo fase de pruebas operativas y se puso en funcionamiento como un centro de investigación en noviembre de 1986. Eidéticos International completó un nuevo túnel de agua con un canal de 15 pulgadas por 20 pulgadas. En la sección horizontal de prueba se incorpora una ventana de visualización para permitir la visualización del flujo en el plano transversal de flujo, así como la forma en planta y vistas laterales. Una versión más grande del mismo túnel de 24 pulgadas por 36 pulgadas de sección de prueba también estaba en construcción y tuvo como objetivo principal proporcionar una capacidad para llevar a cabo experimentos estáticos y dinámicos a mayores ángulos de ataque (a 90°) para apoyar los avances tecnológicos relacionados con la caza. Un túnel de agua diseñado por la División de Aerodinámica de Visual Eidéticos International con una sección de prueba de 24 pulgadas por 24 pulgadas de recorrido de prueba se instaló recientemente en la Corporación General Dynamics en Fort Worth para apoyar sus programas internos de investigación en tecnología de combate avanzado.

Las instalaciones citadas anteriormente tienen su contraparte igual importancia en Europa. Además de ONERA, la empresa Bertin y el túnel del agua en Francia se utilizó recientemente para probar un ala tipo canard para su visualización de flujo. Son numerosas las instalaciones que están en funcionamiento en Inglaterra y se utilizan para diversos problemas de flujo aerodinámico e hidrodinámico. Una comparación sistemática de la posición de los vórtices obtenidos en las configuraciones de misiles delgados en las instalaciones de los túneles de agua y viento se hizo recientemente en la British Aerospace División de Aviones Militares.

Fenómenos de flujos inestables fueron investigados en el tanque de remolque de DFVLR (German Test and Research Institute for Aviation and Space Flight) en Alemania donde los modelos de aviones experimentaron aceleraciones y desaceleraciones. Los modelos de configuraciones completas de aeronaves militares y comerciales y componentes aislados de fuselajes han sido probados en el túnel de agua MBB.

Las instalaciones de agua son un elemento importante en el diseño de los vehículos en los países asiáticos. Un túnel de agua a alta velocidad (hasta 10 pies/s) diseñado por la División de Aerodinámica de Visual eidética Internacional se instaló en un laboratorio de investigación en el Centro de Desarrollo de la Industria Aero en Taiwán en 1984 para apoyar los programas de desarrollo de aviones de ese país. Este túnel tiene una de 24 pulgadas por 24 pulgadas de sección de prueba horizontal. Los investigadores japoneses han hecho un amplio uso de las instalaciones de agua de entender los flujos de fluido sobre las diversas formas aerodinámicas e hidrodinámicas.

Mitsubishi Heavy Industries emplea un tanque de remolque para estudiar diseños de buques de superficie. Un estudio en Mitsubishi llevó a la solución de un problema de vibración por el diseño del casco, mejoras obtenidas mediante pruebas sistemáticas en instalaciones de agua. Las aplicaciones crecientes de instalaciones de agua en el diseño de los vehículos son evidentes a partir de la revisión histórica anterior².

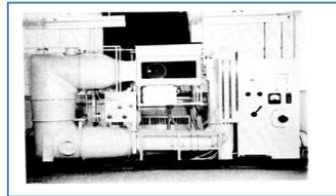
1.5. APLICACIONES DE LA HIDRODINÁMICA EN LA SOLUCIÓN DE PROBLEMAS AERODINÁMICOS

Los experimentos realizados en laboratorios de agua como la NAE, CalTech, Northrop, y la NASA Ames-Dryden, se describen en esta sección para proporcionar una idea de las numerosas aplicaciones de este tipo de instalaciones al aire, el suelo y el diseño de vehículos marinos. NAE y CalTech tienen una larga tradición en la aplicación de túneles de agua a los problemas hidrodinámicos, aeronáuticos y afines. Los Northrop y la NASA Ames-Dryden instalaciones representan una "nueva generación" de los túneles de agua que han hecho contribuciones significativas al diseño del vehículo. Colectivamente estas instalaciones representan más de 100 años de experiencia en los laboratorios hidrodinámicos¹⁵.

¹⁵ NASA-TM- 89409, Water facilities in retrospect and prospect. P 8. Moffed Field, California, Nov 1986.

1.5.1. Establecimiento Aeronáutico Nacional de Ottawa, Canadá. El túnel de agua NAE (Ilustración 17) es un diseño de un circuito cerrado de flujo continuo que tiene un diámetro de 10 in - por 13 in con sección de prueba horizontal, las velocidades de flujo en la sección de trabajo puede variar de 0,2 a 10 pies/s.

Ilustración 17 Túnel de agua NAE

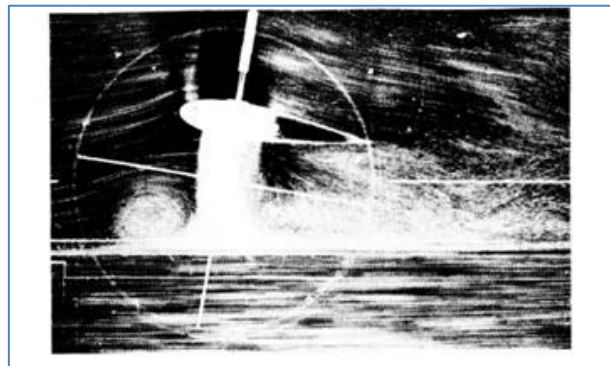


Fuente: Tomada de NASA Technical Memorandum 89409 p.20

Los diversos experimentos llevados a cabo en este centro intentan abarcar los flujos de aire, tierra y vehículos marinos ya sean estables, inestables, separados o unidos. La Ilustración 18 muestra el flujo sobre un ala con un ventilador de elevación sumergido en la proximidad del suelo.

Los trazadores de fluidos revelan el flujo de salida del ventilador en la zona de recirculación y el efecto fuente. Las interacciones fan-wing y el jet-wingflow fueron útiles en la interpretación de las anomalías en el ascenso, arrastre y momento de pitch, características obtenidas en las pruebas de túnel de viento.

Ilustración 18 Ala sumergida en el túnel de agua NAE

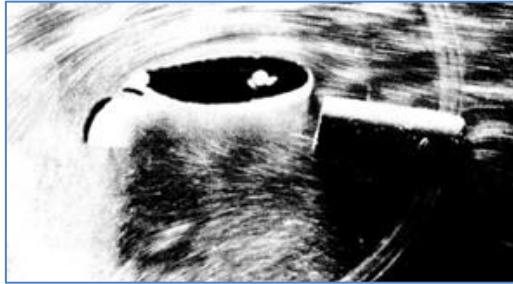


Fuente: Tomada de NASA Technical Memorandum 89409 p.20

La simulación de la situación de flujos es de interés actual para configuraciones avanzadas de aviones de combate con un requisito para el despegue corto y aterrizaje vertical (STOVL). Para tales configuraciones la visualización del flujo de agua podría proporcionar información acerca de los efectos jet-induced sobre la

aerodinámica de configuración y posibles problemas de re-ingestión de gases calientes. La Ilustración 19 muestra la interacción de los gases de escape simulado de un motor de ala montada con un ala ranurada y la parte del borde posterior en disposición solapa.

Ilustración 19 Interacción de gases en el Túnel de agua NAE



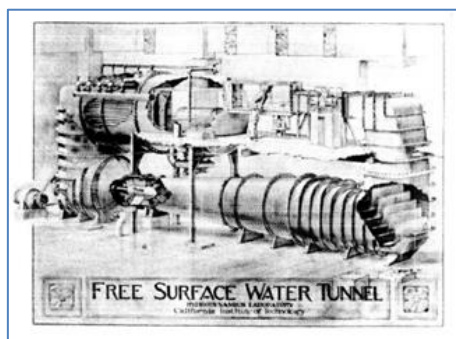
Fuente: Tomada de NASA Technical Memorandum 89409.

1.5.2. Instituto de tecnología Pasadena, California. El Laboratorio de Hidrodinámica de Caltech consiste en el Túnel de Agua Superficial Libre (FSWT) y el túnel de alta velocidad en el agua (HSWT). El FSWT representado en la figura. 12 es un sistema de circulación en circuito cerrado en un plano vertical. La sección de prueba horizontal es de 20 pulgadas de ancho por 30 pulgadas de profundidad y se puede obtener una velocidad de flujo de hasta 25 m / s. En la parte superior o libre, la superficie es una interfaz aire-agua, esta disposición permite investigaciones que se realizan en los órganos que actúan sobre o a una distancia prescrita por debajo de la superficie del agua tal como un hidroperfil ventilado.

El HSWT es también un diseño de circuito cerrado en un plano vertical con características intercambiables secciones de trabajo 2-D y axi-simétrica. La sección en 2-D que se utiliza principalmente para obtener las características seccionales de hidroperfiles, es de 6 pulgadas por 30 pulgadas por 50 pulgadas de largo, mientras que la sección axi-simétrica es de 14 pulgadas de diámetro y 46 pulgadas de largo.

La velocidad de flujo es de hasta 100 pies/s y la presión de 100 psig con respecto a la presión de vapor de agua¹⁵.

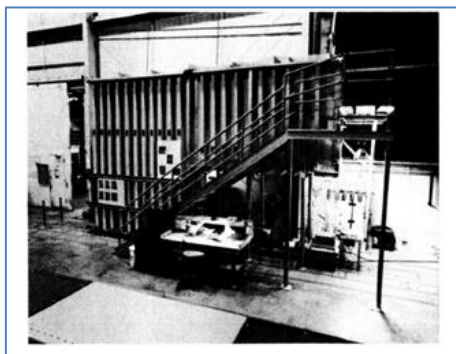
Ilustración 20 Túnel de agua de superficie libre.



Fuente: 1 Tomada de NASA Tecnichal Memorandum 89409

1.5.3. Corporación Northrop. División de aeronaves, California. El túnel de agua de la corporación Northrop es un circuito cerrado con flujo continuo que tiene 16 pulgadas por 24 pulgadas sección de prueba vertical Ilustración 21. En esta instalación se ha utilizado el túnel como una herramienta de diagnóstico para ayudar en el proceso de diseño de la aeronave desde su comienzo en 1977. Fue precedido por un túnel piloto de agua de 6 pulgadas por 6 pulgadas de sección de prueba vertical que podría operar en la descarga por gravedad y los modos de flujo continuo.

Ilustración 21 Instalaciones de la corporación Northrop.



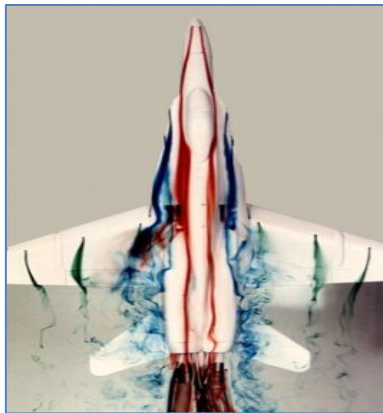
Fuente: Tomada de NASA Tecnichal Memorandum 89409

Las instalaciones Northrop marcaron el advenimiento de las instalaciones de agua que se dedicaban al estudio de los flujos de vórtices desarrollando en sistemas operativos avanzados aviones tácticos/militares para las actitudes extremas. Estas instalaciones satisfacen la necesidad de una herramienta de visualización para mejorar la comprensión y el control de los flujos complejos de vórtices que se han convertido en característica de alta maniobrabilidad de aeronaves militares iniciando con el General Dynamics YF-16 y el Northrop YF-17 Aeronaves militares de peso ligero en 1970¹⁵.

1.5.4. Túnel de agua del Centro de Investigación de vuelo Dryden. El FVF, por sus siglas en inglés, “Flow Visualization Facility”, fue construido en 1983 y fue hecho gracias al túnel de agua del Northrop Corporation en Hawthorne California, este fue diseñado para consumir un mínimo espacio de piso lo que conllevó a orientar la sección de prueba en forma vertical. Por lo tanto se encuentra una sección de prueba vertical, una horizontal, y un tanque de “descanso”, los otros componentes principales como los de bombeo se encuentran a nivel del piso.

La sección de prueba vertical, es una cámara rectangular de 6 pies de alto, 16 pulgadas de profundidad y 24 pulgas de ancho, está hecho de acrílico transparente de 2 pulgadas, en todos sus lados, para que pueda ser observado de la mejor forma posible. Cuenta con una puerta redonda de 16 pulgadas para dar acceso al personal al interior del túnel. La sección horizontal es de 77.5 pulgadas de alto y 24 pulgadas de ancho. Acceso físico y visual a esta unidad horizontal es limitado por causa que la parte superior de esta cámara se encuentra a más de 15 pies de altura y el acceso debe realizarse desde la parte superior. Aunque esta cámara cuenta con características que son propias de ésta, como sus puertas esclusas, que se encuentran al final de la sección. Estas permiten manejar en conjunto con una bomba ajustable el caudal, por lo tanto en el momento de análisis durante la fotografía por medio de sombras las condiciones pueden simularse. Incluso condiciones de velocidades supersónicas e hipersónicas pueden ser simuladas y estudiadas.

Ilustración 22ejemplo de un modelo a escala en la sección de prueba.¹⁶



Fuente: Centro de investigación Rolling Hills. < <http://www.rollinghillsresearch.com/>>

¹⁶ Tomado en línea {<http://www.nasa.gov/centers/dryden/about/Organizations/Technology/Facts/TF-2004-05-FRC.html>}

Una de las partes más grandes del sistema es su tanque de asentamiento, cuando el FVF se encuentra en operación una bomba centrífuga eléctrica de 15hp envía agua a la porción baja del tanque de asentamiento a través de una tubería de 12" pulgadas. El agua entra al tanque a través de una serie de perforaciones o huecos alrededor del perímetro de la tubería de entrada para reducir la turbulencia creada por la acción de la bomba. La acción de bombeo fuerza el agua hacia arriba y al flujo para que fluya a través de la parte superior del tanque en una sección horizontal más pequeña donde pasa a través de dos secciones de laminación que estabilizan el flujo y elimina turbulencias, la sección de prueba horizontal es la porción de la parte superior del canal entre los dos laminadores de flujo.

Después de pasar por la sección horizontal el agua fluye hacia abajo y pasa una tercera sección de laminación que ingresa a la sección vertical. El agua sale de esta sección a través de una tubería de retorno de 8 pulgadas para ser llevada a una bomba centrífuga para recirculación continua. Este consta también con un filtro para mantener el agua limpia. La velocidad del agua puede variar entre 2 y 10 pulgadas por segundo, los resultados muestran que una velocidad mayor a los 3 in/s provee una mejor visualización¹⁵.

2. CONCEPTOS BÁSICOS DE MECÁNICA DE FLUIDOS

2.1. PESO ESPECÍFICO, DENSIDAD, Y TEMPERATURA BASES

2.1.1. Peso específico. En mecánica de fluidos el peso específico representa a fuerza ejercida por la gravedad a una unidad de volumen de un fluido. Por esta razón sus unidades se expresan como fuerza sobre unidad de volumen N/m^3 . El peso específico se puede usar como una propiedad del fluido, además que este varía según su temperatura como en el caso del agua, recordemos qué el peso específico lo denotamos como γ , así que tenemos:

Ecuación 1 Peso específico

$$\gamma = \frac{\text{PESO (W)}}{\text{VOLUMEN (V)}}$$

Tabla 1 Peso específico del agua a distintas temperaturas¹⁷

<i>Temperatura °c</i>	<i>Peso específico N/m^3</i>
0	9805
5	9806
10	9803
20	9786
40	9737

Cabe resaltar que en experimentos generales con agua, se encuentra el valor de γ como 9.8 kN/m^3 a 4°C .

Ecuación 2 Peso obtenido de la ecuación 1.

$$W = \gamma * V$$

¹⁷ MOTT, Robert L. , Mecánica de fluidos. México: Pearson Educación, 2006. P 6. C1

2.1.2. Densidad. La densidad de un material es su masa por unidad de volumen. El símbolo más usado con frecuencia es el rho (ρ), cabe resaltar que usualmente la densidad varía con la temperatura y la presión.

Esta variación típicamente pequeña tanto para sólidos como para fluidos puede ser mayor para gases. Al aumentar la presión sobre un objeto ese disminuye su volumen por lo tanto incrementa su densidad, y al incrementar la temperatura el objeto se expande aumentando su volumen y disminuyendo su densidad¹⁷.

Ecuación 3 formula de la densidad¹⁷

$$\rho = \frac{m}{V}$$

La densidad del agua es

$$\rho = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Tabla 2 Temperatura y densidad del agua.¹⁸

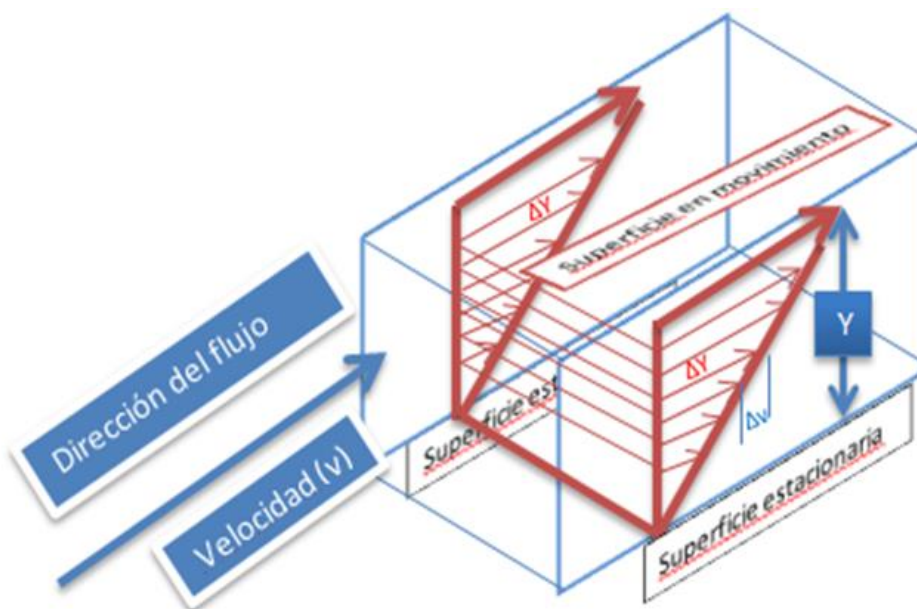
Temperatura °C	Densidad kg / m ³	Temperatura °C	Densidad kg / m ³	Temperatura °C	Densidad kg / m ³
0 (hielo)	917,00	33	994,76	67	979,34
0	999,82	34	994,43	68	978,78
1	999,89	35	994,08	69	978,21
2	999,94	36	993,73	70	977,63
3	999,98	37	993,37	71	977,05
4	1000,00	38	993,00	72	976,47
5	1000,00	39	992,63	73	975,88
6	999,99	40	992,25	74	975,28
7	999,96	41	991,86	75	974,68
8	999,91	42	991,46	76	974,08
9	999,85	43	991,05	77	973,46
10	999,77	44	990,64	78	972,85
11	999,68	45	990,22	79	972,23
12	999,58	46	989,80	80	971,60
13	999,46	47	989,36	81	970,97
14	999,33	48	988,92	82	970,33
15	999,19	49	988,47	83	969,69
16	999,03	50	988,02	84	969,04

¹⁸Tomada en línea [<http://www.fullquimica.com>]

Al igual que el peso específico la densidad del agua también varía con el cambio de temperatura, sin embargo el cambio es mínimo que puede ser despreciado según el tipo de experimento a realizar como lo muestra la Tabla 2.

2.1.3. Viscosidad Absoluta o Dinámica (η). Esta es una de las propiedades de los fluidos en la que se requiere mayor atención cuando se estudia un fluido en movimiento. La viscosidad es la propiedad del fluido que ofrece resistencia a las tensiones del esfuerzo cortante, la ley de la viscosidad de Newton establece “*que para una velocidad angular de deformación dada del fluido el esfuerzo cortante es directamente proporcional a la viscosidad.*” La resistencia de un fluido al esfuerzo cortante depende de su cohesión y del grado de transferencia de cantidades de movimiento de sus moléculas. Según Stretter en su libro de mecánica de fluidos la cohesión parece ser la causa predominante de la viscosidad en un líquido y como la cohesión disminuye con la temperatura a la viscosidad le sucederá lo mismo¹⁹.

Ilustración 23 Acción de la viscosidad en un fluido (cohesión).

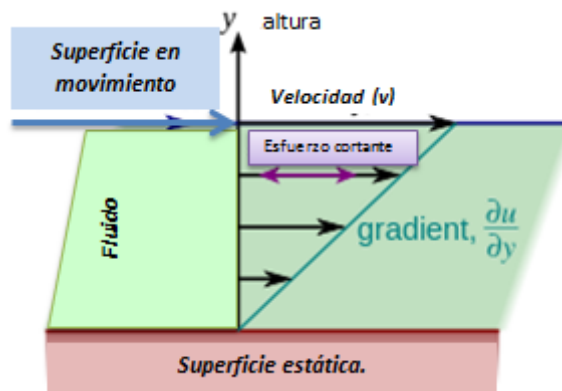


Fuente: Realizada por el autor.

¹⁹ MOTT, Robert L. , Mecánica de fluidos. México: Pearson Educación, 2006. P 6. C2

La mayor parte de la resistencia que aparece en contra del esfuerzo cortante es el resultado de la transferencia de cantidades de movimiento moleculares. En un fluido siempre se encuentra una transferencia de estas moléculas a través de una superficie así sea ficticia, cuando una de estas capas o superficies está en movimiento esto en relación a otra capa adyacente, la transferencia de moléculas de una capa a la otra da un resultado cambiando la cantidad de movimiento de un lado a otro, este movimiento trata de igualar las velocidades pero podemos ver en la gráfica que el Δv que es una variación pequeña pero existente y esta es mayor cuando se aproxima a la superficie en movimiento y menor a la superficie que se encuentra estática.

Ilustración 24 Esfuerzo cortante, gradiente de velocidad y altura.



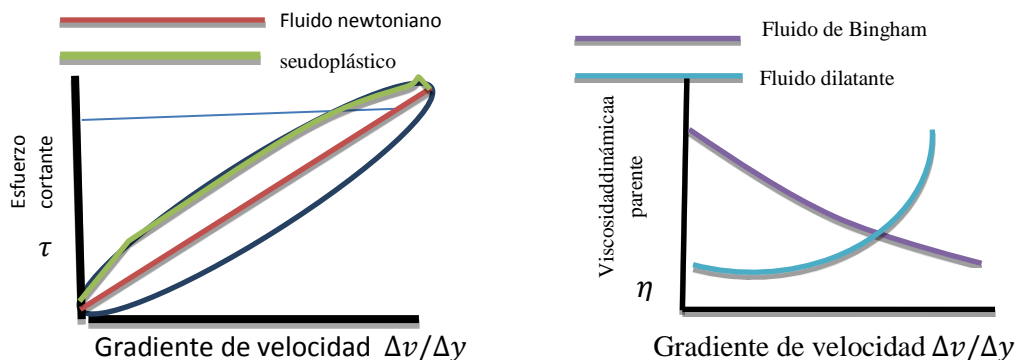
Fuente: Tomada de <http://en.wikipedia.org/wiki/Viscosity>. Modificada por el autor.

En conclusión podemos ver que la viscosidad μ , absoluta o dinámica, es la resistencia a la deformación por fuerzas externas, como vemos en la Ilustración 24 esta resistencia se ve reflejada de forma lineal, característica de los fluidos newtonianos.

2.1.4. Fluido Newtoniano. Se refiere a aquel fluido donde su viscosidad no varía con el tiempo ejemplo de esto es el agua, algunos aceites y algunos minerales. Su curva de esfuerzo vs velocidad es lineal, se muestra en la Ilustración 25. En aclaración los fluidos no Newtonianos son aquellos donde su viscosidad varía con el tiempo²⁰.

²⁰ MOTT, Robert L. , Mecánica de fluidos. México: Pearson Educación, 2006. P 30. C2

Ilustración 25 Graficas de fluidos newtonianos y fluidos de Bingham.



Fuente: tomada de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032109002172>, Modificada por el Autor.

η \longrightarrow Constante
 $\eta(t)$ \longrightarrow η varía según el tiempo transcurrido.

2.1.5. Viscosidad Cinemática (μ). La viscosidad cinemática es el cociente entre la viscosidad absoluta y la densidad.

Ecuación 4 Viscosidad cinemática

$$\mu = \frac{\eta}{\rho}$$

La viscosidad cinemática es parte fundamental ya que interviene en el número Reynolds. Este número lo estudiaremos más adelante detalladamente, la ecuación de Reynolds es;

Ecuación 5 Reynolds con viscosidad absoluta y densidad

$$Re = \frac{\text{Velocidad} * \text{Diámetro} * \text{densidad}}{\text{viscosidad dinámica}} = \frac{VD\rho}{\eta}$$

Ecuación 6 Reynolds con solo la viscosidad cinemática

$$Re = \frac{VD}{\mu}$$

Las unidades de *Viscosidad cinemática* (μ) usualmente son $L^2 * T^{-1}$, es decir en es el sistema métrico m^2/seg , a continuación encontramos una tabla donde refleja

tanto la viscosidad cinemática como la dinámica o absoluta, y como éstas varían según la temperatura afectante, además se puede ver los valores de la tensión superficial entre otros valores²⁰.

Tabla 3 Propiedades físicas del agua.

PROPIEDADES FÍSICAS DEL AGUA							
Temperatura (°C)	Peso específico (kN/m ³)	Densidad (kg/m ³)	Módulo de elasticidad (kN/m ²)	Viscosidad dinámica (N·s/m ²)	Viscosidad cinemática (m ² /s)	Tensión superficial (N/m)	Presión de vapor (kN/m ²)
0	9,805	999,8	$1,98 \cdot 10^6$	$1,781 \cdot 10^{-3}$	$1,785 \cdot 10^{-6}$	0,0765	0,61
5	9,807	1000,0	$2,05 \cdot 10^6$	$1,518 \cdot 10^{-3}$	$1,519 \cdot 10^{-6}$	0,0749	0,87
10	9,804	999,7	$2,10 \cdot 10^6$	$1,307 \cdot 10^{-3}$	$1,306 \cdot 10^{-6}$	0,0742	1,23
15	9,798	999,1	$2,15 \cdot 10^6$	$1,139 \cdot 10^{-3}$	$1,139 \cdot 10^{-6}$	0,0735	1,70
20	9,789	998,2	$2,17 \cdot 10^6$	$1,102 \cdot 10^{-3}$	$1,003 \cdot 10^{-6}$	0,0728	2,34
25	9,777	997,0	$2,22 \cdot 10^6$	$0,890 \cdot 10^{-3}$	$0,893 \cdot 10^{-6}$	0,0720	3,17
30	9,764	995,7	$2,25 \cdot 10^6$	$0,708 \cdot 10^{-3}$	$0,800 \cdot 10^{-6}$	0,0712	4,24
40	9,730	992,2	$2,28 \cdot 10^6$	$0,653 \cdot 10^{-3}$	$0,658 \cdot 10^{-6}$	0,0696	7,38
50	9,689	988,0	$2,29 \cdot 10^6$	$0,547 \cdot 10^{-3}$	$0,553 \cdot 10^{-6}$	0,0679	12,33
60	9,642	983,2	$2,28 \cdot 10^6$	$0,466 \cdot 10^{-3}$	$0,474 \cdot 10^{-6}$	0,0662	19,92
70	9,589	977,8	$2,25 \cdot 10^6$	$0,404 \cdot 10^{-3}$	$0,413 \cdot 10^{-6}$	0,0644	31,16
80	9,530	971,8	$2,20 \cdot 10^6$	$0,354 \cdot 10^{-3}$	$0,364 \cdot 10^{-6}$	0,0626	47,34
90	9,466	965,3	$2,14 \cdot 10^6$	$0,315 \cdot 10^{-3}$	$0,326 \cdot 10^{-6}$	0,0608	70,10
100	9,399	958,4	$2,07 \cdot 10^6$	$0,282 \cdot 10^{-3}$	$0,294 \cdot 10^{-6}$	0,0589	101,33

Fuente: Tomada de http://ocwus.us.es/ingenieria-agroforestal/hidraulica-y-riegos/temario/Tema%207.%20Bombas/tutorial_12.htm.

2.2. FLUJO Y LA ECUACIÓN DE CONTINUIDAD

En muchos sistemas la mayor parte del tiempo se puede encontrar en estado estático, pero para las pruebas es importante que tengamos en cuenta que existirá un flujo y que este flujo tiene una serie de propiedades y efectos que estudiaremos en este segmento. La cantidad de flujo que pasa por un sistema en un tiempo determinado puede expresarse de 3 formas según Robert Mott²¹ en su libro de Mecánica de fluidos, donde resalta lo siguiente;

Q. El flujo Volumétrico es el volumen de fluido que circula en una sección por unidad de tiempo.

W. El flujo en peso, es el peso del fluido que circula en una sección por unidad de tiempo.

M. El flujo másico, es la masa de fluido que circula en una sección por unidad de tiempo.

²¹ MOTT, Robert L. , Mecánica de fluidos. México: Pearson Educación, 2006. P 150. C6

El flujo volumétrico o caudal usualmente utiliza a Q y su importancia en el estudio de flujo de los fluidos es esencial. Este se conoce como el producto del área de la sección transversal por la velocidad del fluido²¹. Por lo tanto,

Ecuación 7 caudal, o flujo volumétrico

$$Q = \text{área} * \text{Velocidad} = AV$$

Sus unidades en el sistema SI usualmente son m^3/s y en el sistema inglés es pie^3/s .

Tabla 4 Unidades de flujo con respecto al tiempo.

Símbolo	Nombre	Definición	Unidades SI	Sistema Inglés
Q	Flujo Volumétrico	$Q = Av$	m^3/s	ft^3/s
W	Flujo en peso	$W = \gamma Av$ $W = \gamma Q$	$\frac{N}{s}$	$\frac{lb}{s}$
M	Flujo másico	$M = \rho Q$ $M = \rho Av$	$\frac{kg}{s}$	$\frac{slugs}{s}$

Fuente: Realizada por el autor basado en la información del libro Mecánica de fluidos de Robert Mott 6ta Edición.

El flujo en un sistema donde los ductos son cerrados como en el caso de varios túneles hidrodinámicos se relacionan directamente con el principio de continuidad. Se debe tener en cuenta que si el sistema no le ingresa, almacena o sale fluido el volumen que circula en cierta cantidad de tiempo es constante, se le conoce como flujo estable por lo tanto si existe un cambio en áreas del sistema lo que puede variar es la velocidad, más el caudal será aproximadamente el mismo en cualquier punto. Si se analiza este fenómeno desde el punto de vista del flujo másico tenemos que M en un punto inicial será el mismo en un segundo punto de medición.

Ecuación 8 Comportamiento de la masa de un flujo²¹.

$$M_1 = M_2$$

Ilustración 26 Ejemplo de una parte de un sistema donde se presentan variaciones de velocidad, presión, y áreas.



Fuente: Modificada por el Autor. Original Robert Mott.

Lo anterior podemos verlo desde otra perspectiva dado que $M = \rho Av$, entonces al igualar la ecuación de ambos puntos será;

Ecuación 9 Ecuación de continuidad²¹.

$$\rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2$$

La anterior ecuación es el enunciado matemático del principio de continuidad y da paso al nombre de ecuación de continuidad, en esta ecuación se relaciona la densidad, área de la sección donde se desplaza el flujo, y la velocidad de este mismo en dos diferentes secciones donde se puede denominar que el flujo es estable.

En el caso de un túnel hidrodinámico donde utilizamos un líquido incompresible (agua), podemos deducir que la densidad es la misma en cualquiera de los dos puntos de estudio $\rho_1 = \rho_2$. Por lo tanto si aplicamos esta igualdad la Ecuación 9 quedaría así;

Ecuación 10 Ecuación de continuidad en líquidos incompresibles²¹

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

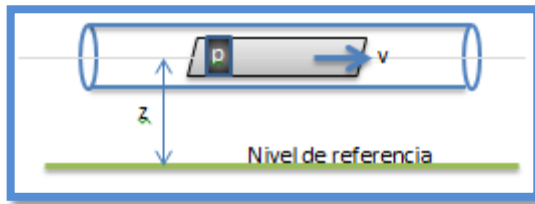
Lo anterior también puede verse como $Q_1 = Q_2$ dado que $Q = Av$.

2.3. ECUACIÓN DE BERNOULLI.

Según el libro de Mecánica de fluidos de Robert Mott, existen tres formas de energía que se tienen en cuenta cuando se realiza un análisis de flujo en tuberías, como la potencial, cinética y de flujo, estas también hacen parte de la definición dada para la ley de la conservación de la energía donde se enuncia que la energía no se crea ni se destruye, solo se transforma de una forma a otra²².

²² MOTT, Robert L. , Mecánica de fluidos. México: Pearson Educación, 2006. P 160. C6

Ilustración 27 Segmento de tubería con flujo de un fluido.



Fuente: Autor (modificada del libro MOTT, Robert L., Mecánica de fluidos.)

- **La energía potencial²³**. se relaciona con algún nivel de referencia, sin embargo puede definirse como la energía que un sistema tiene de forma interna, es decir lista para ser desarrollada y para realizar algún tipo de trabajo. En el caso de la
- Ilustración 27, se relaciona con el nivel de referencia que se denota en la parte baja de la figura.

Ecuación 11 energía potencial.

w = peso del elemento, z altura del elemento respecto a una referencia.

$$EP = wz$$

- **La energía cinética²³**. Es aquella en la que gracias al movimiento se desarrolla una energía, es decir el trabajo que se realiza para acelerar un cuerpo como para mantener una velocidad o variar la misma. Por lo tanto podemos decir que esta se debe a la velocidad.

Ecuación 12 Energía cinética.

g = gravedad.

$$EC = \frac{wv^2}{2g}$$

- **La energía de flujo²³**. Representa la cantidad de trabajo necesaria para suministrar movimiento a una sección de fluido que se encuentra contra presión 'p'.

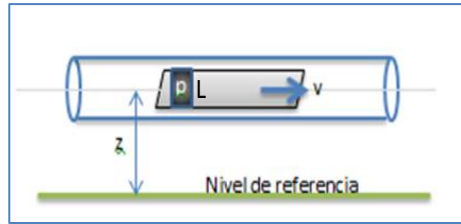
²³ MOTT, Robert L. , Mecánica de fluidos. México: Pearson Educación, 2006. P 166. C6

Es decir para mover la sección de color gris oscuro en la Ilustración 28 donde esta se encuentra bajo una presión 'p' y en un área 'A', debe recorrer una longitud 'L', se puede decir que este trabajo es;

Ecuación 13

$$\text{Trabajo} = pAL = pV$$

Ilustración 28 Segmento de tubería, contra presión.



Fuente: Autor (modificada del libro MOTT, Robert L., Mecánica de fluidos.)

Donde V es el volumen del elemento o sección de fluido y como V es parte de la ecuación donde;

Ecuación 14

$$w = \gamma V$$

Se deduce que $V = \frac{w}{\gamma}$ por lo que al reemplazarlo en la ecuación de trabajo tenemos;

Ecuación 15 Trabajo.

$$\text{trabajo} = pV = \frac{pw}{\gamma}$$

Por lo tanto la ecuación para EF queda,

Ecuación 16 Energía de flujo

$$EF = \frac{wp}{\gamma}$$

Con las anteriores ecuaciones de energía podemos hallar la cantidad total de energía E del elemento o sección de flujo que se esté estudiando,

Ecuación 17 Energía total

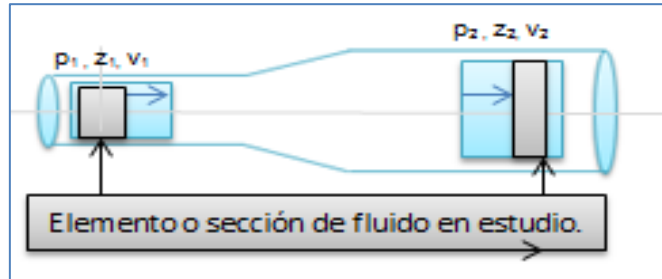
$$E = EF + EP + EC$$

Si reemplazamos cada término con sus respectivas ecuaciones equivalentes, tenemos;

Ecuación 18 Energía total, reemplazando con ecuaciones equivalentes

$$E = \left(\frac{wp}{\gamma} \right) + (wz) + \left(\frac{wv^2}{2g} \right)$$

Ilustración 29 Elementos de la ecuación de Bernoulli.



Fuente: Tomada y modificada del libro de mecánica de fluidos de Robert Mott 6ta Edición.

Como se explicó anteriormente la energía no se destruye solo se transforma por lo tanto la energía que se encuentre en el punto 1 de alguna forma se conservará en el punto 2. Al aplicar el principio de conservación de energía debemos igualar ambos puntos;

Ecuación 19

$$E_1 = E_2$$

$$\left(\frac{wp_1}{\gamma} \right) + (wz_1) + \left(\frac{wv_1^2}{2g} \right) = \left(\frac{wp_2}{\gamma} \right) + (wz_2) + \left(\frac{wv_2^2}{2g} \right)$$

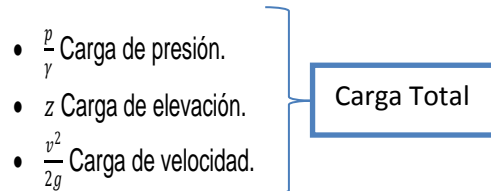
Se aprecia que el término w es común en la ecuación, por lo tanto si dividimos todos los términos por w , tenemos;

Ecuación 20 Ecuación de Bernoulli

$$\left(\frac{p_1}{\gamma} \right) + (z_1) + \left(\frac{v_1^2}{2g} \right) = \left(\frac{p_2}{\gamma} \right) + (z_2) + \left(\frac{v_2^2}{2g} \right)$$

Según Robert Mott en su libro la ecuación de Bernoulli es el resultado después de dividir los términos de energía por el peso del elemento del fluido, por lo tanto **cada término de esta ecuación es una forma de energía que posee el fluido por unidad de peso del fluido que se mueve en el sistema.**

Una característica particular de los términos de la ecuación de Bernoulli es que sus unidades son $N \cdot m/N$, o $lb \cdot pie/lb$, pero como se observa se tiene la unidad de fuerza tanto en el numerador como en el denominador, esto hace que resulte que las unidades sean expresadas en m (metros), o ft (pies), en sistemas hidráulicos se acostumbra a mencionar esta unidad como altura, usualmente relacionado con un nivel de referencia. También se le puede denominar como carga, por lo tanto los términos se pueden denominar así:



La suma de las anteriores cargas se le denomina carga total, estas cargas pueden variar sus valores a medida que el flujo avanza en un sistema, sin embargo la carga total puede ser la misma siempre y cuando no haya pérdidas ni ganancias de energía.

En conclusión la ecuación de Bernoulli es una herramienta con la cual podemos verificar los cambios de carga de elevación, presión y velocidad entre dos puntos de estudio en un sistema de flujo teniendo en cuenta que en esta ecuación no se encuentran aumentos ni pérdidas de energía ya que de lo contrario los valores serán erróneos, en este caso la carga total debe ser constante.

Con lo anterior se pueden realizar algunos cálculos iniciales para un sistema como el túnel hidrodinámico. El túnel la mayor parte del tiempo estará en reposo por lo tanto un aspecto que se puede deducir es la presión en diferentes puntos del sistema y a su vez tiene una referencia para el análisis del fluido en movimiento agregando energía al sistema por medio de una bomba y teniendo pérdidas por causa de la fricción del fluido con la tubería, además de las pérdidas que causan los accesorios como válvulas, codos, etc.

Para poder hallar las presiones iniciales del sistema se debe identificar su tipo de tubería en el caso de un sistema existente y si está en etapa de diseño la instalación de tubería debe acercarse a la realidad dado que irá conectada a una bomba que será la encargada de causar movimiento en el sistema.

3. FLUJO EN TUBERÍAS, NÚMERO REYNOLDS Y PÉRDIDAS DE ENERGÍA²⁴

3.1. TUBERÍAS

La elección de las tuberías es un tema de gran importancia dado que esta influye en costos, duración, seguridad, y rendimiento, aunque en nuestro sistema la sección de tubería es corta en relación a otros tipos de sistemas en los que tienen longitudes grandes, nuestro sistema debe ser analizado para identificar valores de pérdidas y ganancias de energía.

Las tuberías se clasifican según su tamaño nominal y número de cédula, cuando se habla de número de cédula se refiere a la presión permisible de operación como el esfuerzo permisible en la tubería, el rango de número cédula va desde 10 a 160, los número más altos indican un espesor mayor en la pared de la tubería teniendo en cuenta que los diámetros exteriores pueden ser los mismos entre cédulas pero el diámetro interior varía según este.

Tabla 5 Tamaños nominales de tuberías.

Tamaño					
estandar pulgadas	métrico DN (mm)	estandar pulgadas	métrico DN (mm)	estandar pulgadas	métrico DN (mm)
1/8	6	6	150	30	750
1/4	8	8	200	32	800
3/8	10	10	250	36	900
1/2	15	12	300	40	1000
3/4	20	14	350	42	1100
1	25	16	400	48	1200
1 1/4	32	18	450	54	1400
1 1/2	40	20	500	60	1500
2	50	22	550	64	1600
2 1/2	65	24	600	72	1800
3	80	26	650	80	2000
4	100	28	700	88	2200

Fuente: Tomada de la International Standards Organization ISO.

²⁴ La información general de este capítulo fue tomada de Documentos Pavco (ver Bibliografía) y el libro de mecánica de fluidos de Robert Mott 6ta edición.

La información de la Tabla 6, solo indica los nombres del tamaño de la tubería, sin embargo para los cálculos de áreas de flujo es necesario manejar otras tablas en las cuales se encuentra información como el diámetro interior, exterior y espesor de la pared, si vemos un tubo cédula 40 de 50mm este tendrá las mismas dimensiones de un tubo cédula 40 de 2 pulgadas.

3.1.1. Diámetro Nominal y Diámetro Real. Al observar la Tabla 5 y como se habló anteriormente el diámetro nominal es el diámetro que identifica de forma regular a una tubería específica, sin embargo si se analiza una tubería de forma más detallada se encontrará que los diámetros de la tubería no son exactos al diámetro nominal, es por esto que se busca el diámetro real.

Como ejemplo se aprecia en la siguiente Tabla 6 el tipo de cédula y una comparación de diámetros tanto externos como internos con el diámetro nominal.

Tabla 6 Comparación entre diámetro interno y externo a diferentes cédulas.

Norma de fabricación	Diámetro nominal (mm)	Diámetro interno (mm)	Diámetro externo (mm)
ASTM D 1785 Sch 40	50	52.50	60.32
ASTM D 1785 Sch 80	50	49.24	60.32
ASTM D 1785 Sch 120	50	47.62	60.32
ASTM D 2241 SDR 13.5	50	51.38	60.32
ASTM D 2241 SDR 17	50	53.21	60.32
ASTM D 2241 SDR 21	50	54.58	60.32
ASTM D 2241 SDR 26	50	55.71	60.32
ASTM D 2241 SDR 32.5	50	56.62	60.32
ASTM D 2241 SDR 41	50	57.38	60.32
Conduit liviano	50	51.34	54.94

Diámetros
externos
iguales

Fuente: Tomada de <http://www.aaatech.com/hardware/clevis-hangers/612/>.

En la Tabla 6 se aprecia que el diámetro externo nominal es el mismo en las diferentes tuberías, sin embargo el diámetro interno en todas varía notablemente lo que significa que la pared de las tuberías varía según su cédula o norma de fabricación además de su capacidad hidráulica. El diámetro externo es casi igual en la mayoría de los casos.

3.1.2. Cédula o calibre en tuberías. Originalmente las especificaciones por cédula se daban para tuberías de hierro galvanizado para presión, originalmente se le conocía como “Schedule” y se nombraba a la tubería Sch 40, Sch 80 y Sch 120. Cada una de las clasificaciones define las características dimensionales como diámetros, espesores, y tolerancias. Luego en la llegada de tuberías de PVC, estas adoptaron este criterio de clasificación bajo cédula, en la siguiente Tabla 7 se observa estas diferencias entre cédulas bajo un diámetro nominal de 50mm:

Tabla 7 Tabla de Tuberías Amanco- diferencias entre distintas cedulas.

	Sch 40	Sch 80	Sch 120
Diámetro externo, D_o (mm)	60.32	60.32	60.32
Diámetro interno (mm)	52.50	49.24	47.62
Espesor de pared, t (mm)	3.91	5.54	6.35
Presión de trabajo P (kg/cm ²)	19.6	28.0	32.9

Fuente: Catalogo de especificaciones de productos Amanco <www.amanco.com>.

Para efectos de diseño de tuberías hidráulicas, la cédula es un parámetro muy importante ya que este aparte de los diámetros indica la presión de trabajo y este está directamente relacionado con el espesor de pared de la tubería. Esto se puede apreciar en la Tabla 8.

Tabla 8 Presión sobre tuberías de PVC.

Material	Presión Sostenida 1000 horas		Presión Mínima de Ruptura 90 segundos	
	Kg/cm ²	psi	Kg/cm ²	psi
Tubería PVC RDE 9	73.82	1050	112.05	1600
Tubería PVC RDE 11	59.05	840	87.88	1250
Tubería PVC RDE 13.5	47.10	670	70.30	1000
Tubería PVC RDE 21	29.53	420	44.29	630
Tubería PVC RDE 26	23.90	340	35.15	500
Tubería PVC RDE 32.5	18.28	260	28.12	400
Tubería PVC RDE 41	14.76	210	22.15	315
Accesorios PVC	37.26	530	56.24	800
Tiempo de Fraguado	Esfuerzo Cortante		Presión Hidrostática	
	Kg/cm ²	psi	Kg/cm ²	psi
2 Horas	17.58	250	28.12	400
16 Horas	35.15	500		
72 Horas	63.28	900		

Fuente: Tomada del manual de productos PAVCO.

3.1.3. Que es el RDE?²⁵ En la Tabla 8 en la sección de material se nombra el RDE, para entender un poco este término se relaciona al comienzo de la producción de tuberías de PVC donde en aquellos tiempos solo existían normas para tubería metálica y las clasificaban por calibres como el 40 o el 80, por lo tanto las primeras tuberías de PVC se clasificaron de la misma forma y con los mismos espesores de pared sin embargo se encontraban desfases entre la tubería metálica y de PVC, así que comenzaron con la normalización para esta tubería y accesorios por lo tanto como resultado se obtuvo una norma donde relacionan el diámetro del tubo y el espesor de la pared dándole el nombre de RDE y así facilitar saber la presión de trabajo que se permite en una tubería, el RDE es constante e independiente del diámetro de la misma, esta norma se basó en la formula ISO (international Standards Organization) la cual es la siguiente:

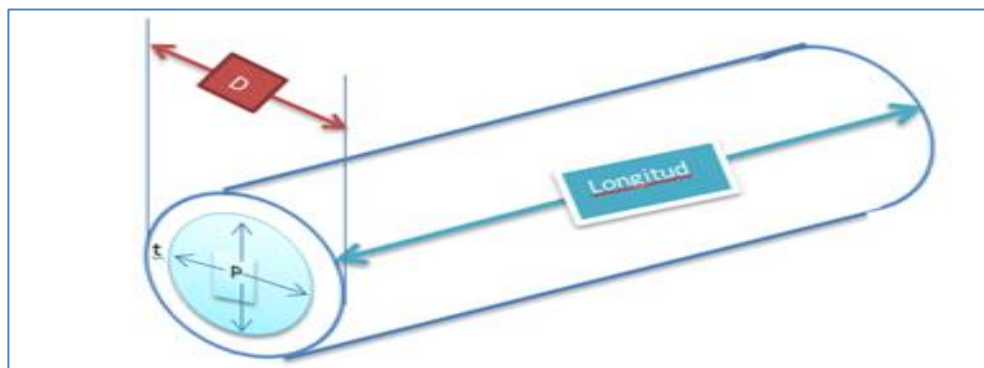
Ecuación 21 Formula ISO base para ver la relación RDE con D/t).

$$\frac{2S}{P} - R - 1 \text{ o } \frac{2S}{P} - \frac{D}{t} - 1$$

Donde:

- S - la tensión de trabajo del material
- P - la presión hidrostática permitida
- D - el diámetro exterior
- t - el espesor de la pared del tubo
- R - RDE, relación diámetro espesor

Ilustración 30 Medidas para la relación RDE con (D/t).



Fuente: Realizada por el Autor.

²⁵ Productos Pavco<http://www.bipm.org/utis/common/pdf/si_brochure_8_en.pdf>.

Tabla 9 Dimensiones de tuberías a diferentes RDE.

Tabla 5 Dimensiones de tuberías a diferentes RDE.

Tuberías Presión PAVCO

Diámetro Nominal		Referencia	Peso	Diámetro Exterior Promedio		Espesor de Pared Mínima		Diámetro Interior Promedio
mm	in/pulg			mm	in/pulg	mm	in/pulg	
RDE 9 PVC Presión de Trabajo a 23°C: 500 PSI								
21	1/2	2900296	218	21.34	0.840	2.37	0.093	16.60
RDE 11 PVC Presión de Trabajo a 23°C: 400 PSI								
26	3/4	2900210	304	26.67	1.050	2.43	0.095	21.81
RDE 13.5 PVC Presión de Trabajo a 23°C: 315 PSI								
21	1/2	2902448	157	21.34	0.840	1.58	0.062	18.18
33	1	2900213	364	33.40	1.315	2.46	0.097	28.48
RDE 21 PVC Presión de Trabajo a 23°C: 200 PSI								
26	3/4	2900237	188	26.67	1.050	1.52	0.060	23.63
33	1	2900229	252	33.40	1.315	1.60	0.063	30.20
42	1 1/4	2900225	395	42.18	1.660	2.01	0.079	38.14
48	1 1/2	2902436	514	48.26	1.900	2.29	0.090	43.68
60	2	2902453	811	60.32	2.375	2.87	0.113	54.58
73	2 1/2	2900230	1185	73.03	2.875	3.48	0.137	66.07
88	3	2900233	1781	88.90	3.500	4.24	0.167	80.42
114	4	2900240	2904	114.30	4.500	5.44	0.214	103.42
168	6	2904816	5835	168.28	6.625	8.03	0.316	152.22
RDE 26 PVC Presión de Trabajo a 23°C: 160 PSI								
60	2	2900246	658	60.32	2.375	2.31	0.091	55.70
73	2 1/2	2900248	964	73.03	2.875	2.79	0.110	67.45
88	3	2900251	1438	88.90	3.500	3.43	0.135	82.04
114	4	2900254	2376	114.30	4.500	4.39	0.173	105.52
168	6	2904817	4759	168.28	6.625	6.48	0.255	155.32
RDE 32.5 PVC Presión de Trabajo a 23°C: 125 PSI								
88	3	2900256	1157	88.90	3.500	2.74	0.108	83.42
114	4	2900258	1904	114.30	4.500	3.51	0.138	107.28
RDE 41 PVC Presión de Trabajo a 23°C: 100 PSI								
114	4	2900261	1535	114.30	4.500	2.79	0.110	106.72

Para Tuberías de 8", 10", 12", 14", 16", 18" y 20" de diámetro véase nuestro Manual Técnico Unión Plástico. La longitud normal de los tramos es de 6m. La Tubería no debe recarsear.

Fuente: Tomada del manual de Productos Pavco<http://www.bipm.org/utis/common/pdf/si_brochure_8_en.pdf>.

3.1.4. Uniones y accesorios de tuberías.

Uniones: Las uniones entre tuberías usualmente son de tipo campana-espiga, y estas se realizan usando cemento solvente o pegante líquido, aunque también existen empaques de hule para cierres herméticos. Las uniones por medio de cemento solvente son fáciles de realizar sin embargo estas deben ajustarse a procedimientos que aseguran la calidad del sistema ya que un gran porcentaje de problemas se originan en uniones cementadas defectuosas, esto según la información suministrada por la fábrica de tuberías Amanco.

Accesorios: Se refieren a aquellas partes que se acoplan a la tubería regular con el fin de realizar cambios de dirección, derivaciones, cambios de diámetro, adaptaciones, transiciones a diferentes materiales etc. Cuando de tuberías que trabajarán bajo presión se refieren se utilizan accesorios cédula 40.

Ilustración 31 Tipos de codos de 90 grados.



Fuente: Tomada del manual de Productos Pavco<http://www.bipm.org/utis/common/pdf/si_brochure_8_en.pdf>.

3.2. FUERZAS RESULTANTES EN SISTEMAS DE TUBERÍAS –FLUIDO ESTÁTICO²⁶

Algunos sistemas no se encuentran en funcionamiento continuamente además que para cálculos iniciales es conveniente saber las presiones en distintos puntos del sistema en estado estático para realizar futuros cálculos dinámicos. Es preciso saber que fuerzas y presiones actúan sobre el sistema y además que los materiales escogidos sean los apropiados y que no vayan a tener algún tipo de falla que ponga en riesgo la integridad del mismo. Los efectos de la presión de un fluido como el agua que actúan sobre superficies planas como los túneles hidrodinámicos en su sección de visualización ejercen una fuerza que actúa de forma perpendicular a la superficie.

Lo anterior se puede ver según la definición de presión de una fuerza en un área determinada por lo tanto;

Ecuación 22 Ecuación de presión.

$$p = \frac{F}{A}$$

O la forma correspondiente a la fuerza;

Ecuación 23 Ecuación correspondiente a Fuerza

$$F = A \cdot p$$

A modo de ejemplo la sección de visualización de un sistema hidrodinámico es la sección donde la mayor cantidad de agua será acumulada por lo tanto la presión

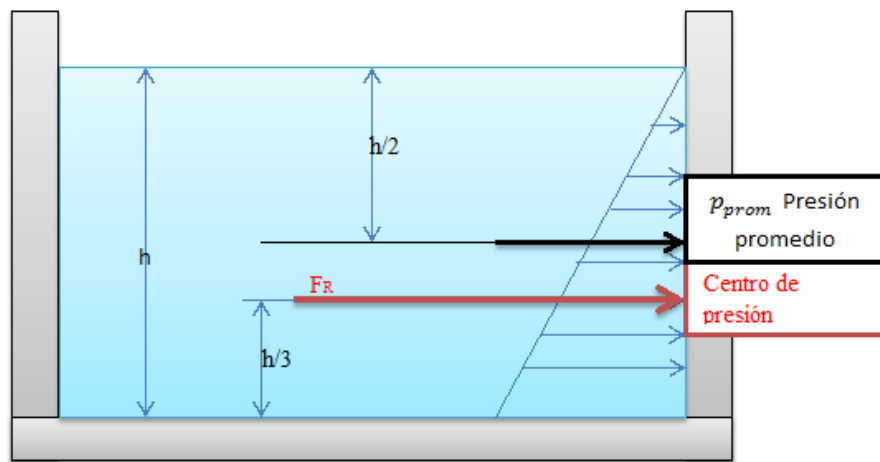
²⁶ MOTT, Robert L. , Mecánica de fluidos. México: Pearson Educación, 2006. P 100. C4

en este punto debe saberse para verificar que el tanque de la sección es lo suficientemente fuerte para resistir dichas presiones o fuerzas resultantes además de saber en qué lugar de las paredes del tanque actúan estas fuerzas, es decir hallar el centro de presiones donde se concentra la fuerza y que magnitud tiene esta.

3.3. CENTRO DE PRESIÓN

El centro de presión es el punto donde la fuerza resultante F_R actúa sobre el área en estudio y tiene el mismo efecto que la fuerza distribuida en toda el área debido a la presión causada por el fluido.

Ilustración 32 Vista frontal de un depósito. Distribución de presiones.



Fuente: Realizada por el autor.

La Ilustración 32 muestra la distribución de presiones sobre una de las paredes verticales del tanque o sección de visualización, según el libro de Robert Mott en el capítulo 4 la presión varía de forma lineal y así se indica con la siguiente ecuación;

Ecuación 24 Fuerza resultante

$$FR = P_{prom} * A$$

Donde P_{prom} es la presión promedio y A es el área total de la pared, por lo tanto como la presión promedio se encuentra en la mitad de la altura del agua con respecto a la pared esta se puede hallar por medio de la siguiente ecuación;

$$P_{prom} = \gamma \left(\frac{h}{2} \right) \dots h = \text{profundidad} \dots \gamma = \text{peso específico}$$

3.4. PÉRDIDAS Y GANANCIAS DE ENERGÍA²⁷

Existen varios dispositivos y componentes en un circuito de tuberías o un sistema donde haya circulación o flujo de fluido. Estos dispositivos pueden agregar o retirar energía al fluido, energías deseadas o indeseadas, estas últimas coloca en riesgo el sistema o simplemente no se obtiene el objeto del sistema.

En los túneles hidrodinámicos como en otros sistemas se deben analizar los dispositivos que afectarán la energía del sistema como la bomba, y accesorios de tubería que causan pérdidas de energía por fricción como lo son los cambios en el tamaño de la trayectoria, válvulas entre otros.

3.4.1. Fricción del fluido. Cuando existe un flujo se presenta una resistencia por fricción donde parte de la energía del sistema puede convertirse en energía térmica que se disipa a través de las paredes de la tubería por la que circula el fluido. La magnitud de la energía que se transforma depende de las propiedades del fluido, velocidad del flujo, el diámetro de la tubería, el acabado y longitud de la misma. Es normal que accesorios que controlan la dirección o flujo volumétrico ocasionen pérdidas de energía al crear turbulencias en la región que actúan. Siempre que el flujo encuentra un cambio de dirección o restricción se encontrarán pérdidas de energía transformada en calor. Usualmente a las pérdidas de energía a causa de válvulas y accesorios en sistemas grandes se les denomina pérdidas menores, sin embargo para sistemas pequeños estas pérdidas se deben de tener en cuenta para seguridad del mismo dado que la bomba puede resultar averiada, o simplemente no obtener el flujo deseado en alguna sección deseada.

La energía de un sistema con sus pérdidas y ganancias se contabiliza en términos de energía por unidad de peso del fluido que como se vio anteriormente es usualmente conocido como carga. La abreviación usual en mecánica de fluidos para carga es la “*h*”, sin embargo para diferenciar las pérdidas y ganancias de energía se obtienen las siguientes abreviaciones;

* h_A =Energía agregada por medio de un dispositivo mecánico como bombas, en el comercio puede encontrarse como la carga total sobre la bomba.

²⁷ MOTT, Robert L. , Mecánica de fluidos. México: Pearson Educación, 2006. P 226. C8

* h_R =Energía removida por un dispositivo mecánico.

* h_L =Energía perdida por la fricción en las tuberías, válvulas y accesorios.

“La magnitud de las pérdidas de energía que produce la fricción del fluido, válvulas y accesorios, es directamente proporcional a la carga de velocidad del fluido”.

La expresión matemática para la anterior acotación es;

Ecuación 26Ecuación para hallar la pérdida de energía.

$$h_l = K \left(\frac{v^2}{2g} \right)$$

Donde K es el término que representa el coeficiente de resistencia, este usualmente se halla por medio de la ecuación de Darcy que se verá más adelante.

Aplicando el principio de la conservación de la energía como es usual se escogen 2 secciones para ser analizadas y a cada sección se le puede asignar E'_1 y E'_2 , denotando la energía que tiene el fluido por unidad de peso en las dos secciones analizadas.

Ecuación 27 Extensión de la ecuación de Bernoulli aplicada para pérdidas y ganancias de energía.

$$E'_1 + h_A - h_R - h_L = E'_2$$

La Ecuación 27 es una extensión de la ecuación de Bernoulli la cual da la posibilidad de resolver problemas donde se encuentran pérdidas y ganancias de energía. En el término E'_1 se refiere a la representación de la energía que posee el fluido por unidad de peso, donde,

Ecuación 28 Energía por unidad de peso.

$$E'_1 = \frac{p}{\gamma} + z + \frac{v^2}{2g}$$

Reemplazando la Ecuación 28 en la Ecuación 27 tenemos,

Ecuación 29

$$\frac{p}{\gamma} + z + \frac{v^2_1}{2g} + h_A - h_R - h_L = \frac{p}{\gamma} + z + \frac{v^2_2}{2g}$$

Recordemos que h_R representa la energía removida por un dispositivo, es decir que la energía que posee el flujo del fluido se la transmite a un dispositivo para

causar algún tipo de trabajo pero en algunos sistemas como un túnel hidrodinámico sencillo no se aplica este elemento así que podemos omitirlo en la ecuación quedando así,

Ecuación 30 Ecuación de energía.

$$\frac{p}{\gamma} + z + \frac{v_1^2}{2g} + h_A - h_L = \frac{p}{\gamma} + z + \frac{v_2^2}{2g}$$

3.4.2. Ecuación de Darcy²⁸. Una componente de la pérdida de energía es la fricción en el fluido que circula h_L , la fricción causada por la interacción entre el flujo y tuberías es proporcional a la carga de velocidad del flujo y a la relación de la longitud y el diámetro de la corriente, la expresión matemática para este anunciado se le denomina la ecuación de Darcy;

Ecuación 31 Ecuación de Darcy²⁸.

$$h_L = f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g}$$

h_L = pérdida de energía debido a la fricción

L = longitud de la corriente del flujo

D = diámetro de la tubería

v = velocidad promedio del flujo

f = factor de fricción

La ecuación de Darcy es muy utilizada para obtener el cálculo de la pérdida de energía debido a la fricción, usualmente en secciones rectilíneas y largas de tubos circulares donde se encuentra un flujo sin importar si este es laminar o turbulento.

3.4.3. Pérdidas de energía en flujo laminar²⁸. Los tipos de flujo se analizarán más adelante ya que están relacionados con el número Reynolds y este determina si un flujo es laminar o turbulento dado a los parámetros que rige este número bajo ciertas condiciones.

Sin embargo para aclaración en el tópico que se está desarrollando cabe aclarar que cuando existe un flujo laminar el fluido parece moverse en capas, donde cada capa de forma ordenada está una sobre la otra. Una de las propiedades del fluido

²⁸ MOTT, Robert L. , Mecánica de fluidos. México: Pearson Educación, 2006. P 233. C8

es la viscosidad que se vio anteriormente en este documento donde se habla que esta propiedad se encuentran esfuerzos entre las capas causando una pérdida de energía por la acción de las fuerzas de fricción que hay que vencer y que son producidas por el esfuerzo cortante. Por este motivo la ecuación de Hagen-Poiseuille muestra la relación entre la pérdida de energía y los parámetros mensurables del flujo del sistema.

Ecuación 32 Ecuación de Hagen-Poiseuille

$$h_L = \frac{32\eta Lv}{\gamma D^2}$$

Los parámetros mensurables involucrados en la ecuación son la viscosidad, peso específico, longitud - diámetro de la tubería, y la velocidad promedio. Para flujo laminar debe tenerse en cuenta que la pérdidas de energía son independientes a la superficie de la tubería, en este caso son las pérdidas por fricción viscosa en el interior del fluido las que determinan la magnitud de la pérdida de energía. La Ecuación 32 es válida solamente para flujo laminar es decir número Reynolds menores a 2000 por lo tanto podemos igualar la ecuación de Hagen y Darcy dado que juntas son para hallar pérdidas de energía por fricción en flujo laminar.

Ecuación 33 Igualación de ecuaciones Darcy y Hagen Poiseuille

$$f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g} = \frac{32\eta Lv}{\gamma D^2}$$

Despejando el factor de fricción 'f',

$$f = \frac{D2g}{Lv^2} * \frac{32\eta Lv}{\gamma D^2} = \frac{64\eta}{vD\rho}$$

Ecuación 34

$$f = \frac{64\eta}{vD\rho}$$

La ecuación de número Reynolds es;

Ecuación 35 Ecuación para obtener el número Reynolds.

$$N_R = \frac{vD\rho}{\eta}$$

Se puede ver que la Ecuación 34 está estrechamente relacionada con el número Reynolds por lo que al reemplazar el factor de fricción queda;

Ecuación 36 Factor de fricción para flujo laminar.

$$f = \frac{64}{N_R}$$

Para comprender mejor la anterior ecuación se debe tener un concepto claro sobre el número Reynolds y así continuar con el análisis general del flujo y de las pérdidas de energía.

3.5. Número Reynolds²⁹.

Un aspecto fundamental que se debe tener en cuenta siempre que se trabaja con fluidos es la pérdida de energía ya que el flujo puede tener un comportamiento turbulento o laminar ocasionando que se produzcan pérdidas de energía. Por tal motivo se necesita una herramienta para poder predecir el comportamiento del fluido, no es fácil determinar si el flujo es turbulento o laminar en una tubería regular pues la visualización es limitada. En el número Reynolds se denotan cuatro variables como densidad ' ρ ', viscosidad ' η ', dimensión circular o diámetro del tubo ' D ', y la velocidad promedio del flujo ' v '.

Osborne Reynolds fue quien demostró que se puede pronosticar si un flujo será laminar o turbulento obteniendo un número adimensional, por lo tanto nace el número Reynolds y la definición matemática es;

Ecuación 37 Número Reynolds

$$N_R = \frac{vD\rho}{\eta} = \frac{vD}{\mu}$$

Se puede apreciar las dos formas donde se involucran las variables del fluido, en la segunda opción vemos a ' μ ' que representa la viscosidad cinemática donde esta se define matemáticamente como la relación de viscosidad absoluta y la densidad del fluido $\mu = \eta/\rho$.

La definición en física del número Reynolds es la fuerza de inercia que existe sobre un fluido a la fuerza viscosa. La fuerza de inercia se desarrolla a partir de la

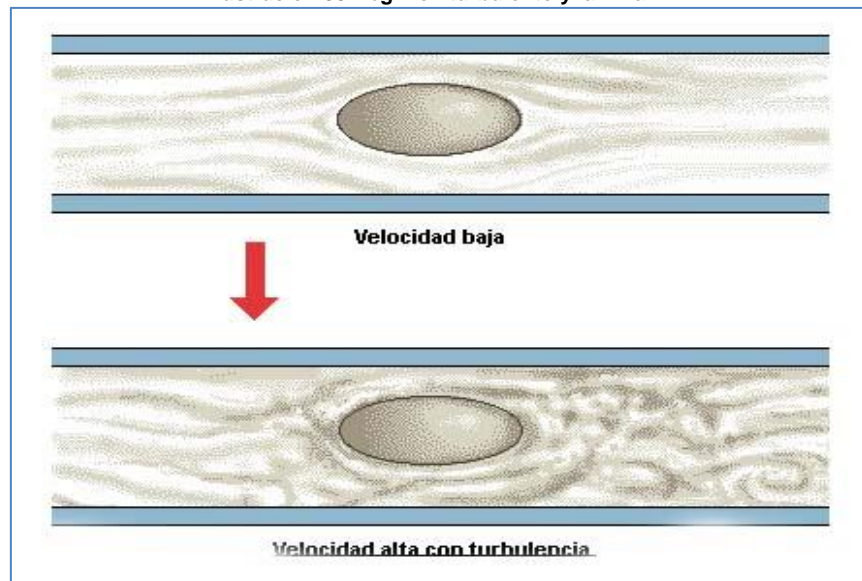
²⁹ MOTT, Robert L. , Mecánica de fluidos. México: Pearson Educación, 2006. P 230. C8

segunda ley de Newton donde $F = ma$ y la viscosidad se relaciona con el producto del esfuerzo cortante por el área. Esta relación se ve reflejada en el comportamiento del flujo de los fluidos ya que en la variación de alguno de los parámetros pueden resultar en flujos turbulentos o laminares, por ejemplo, flujos con gran caudal, gran velocidad y una viscosidad baja tienden a ser turbulentos, y aquellos donde su velocidad es baja y tienen una viscosidad alta tienden a ser laminares. Para determinar esto Osborne Reynolds adoptó en su fórmula una aplicación práctica donde si el numero resultante de la fórmula es menor que 2000 este será laminar y si es mayor a 4000 este será turbulento, lo que deja un espacio entre el 2000 y 4000, a este espacio se le denomina como número crítico o de transición por lo que se puede decir que es una zona de incertidumbre ya que puede variar fácilmente el régimen del flujo por lo tanto se aconseja que para obtener el objetivo del flujo se varíe el caudal o el diámetro del sistema para salir de la región crítica. Aunque es posible obtener flujos laminares en números Reynolds grandes con un debido acondicionamiento para librar todo tipo de perturbaciones en la forma práctica y para sistemas que necesitan garantizar flujos laminares se pueden mantener los parámetros antes mencionados donde;

$N_R < 2000$ será laminar.

$N_R > 4000$ será turbulento.

Ilustración 33 Régimen turbulento y laminar.³⁰



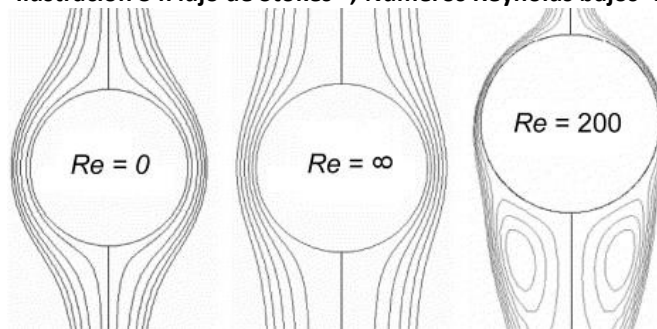
Fuente: Tomada en línea de <http://rabfis15.uco.es/MecFluidos/1024/Untitled-30.htm>>

³⁰Tomada en línea [<http://rabfis15.uco.es/MecFluidos/1024/Untitled-30.htm>]

3.5.1. Numero Reynolds en cuerpos sumergidos en fluido. La fuerza viscosa aumenta por la fricción interna de un fluido y la fuerza de inercia representa la resistencia natural de un fluido a la aceleración. En flujos de bajos números Reynolds la fuerza de inercia puede ser tomada como insignificante comparada con la fuerza viscosa mientras que en flujos con números Reynolds altos la fuerza viscosa es pequeña en relación con la fuerza de inercia.

$$N_R \approx \frac{\text{FUERZA DE INERCIA}}{\text{FUERZA VISCOSA}}$$

Ilustración 34Flujo de Stokes³¹, -Números Reynolds bajos -.



Fuente: Tomada en línea de [http://history.nasa.gov/flujos de Stokes](http://history.nasa.gov/flujos%20de%20Stokes)

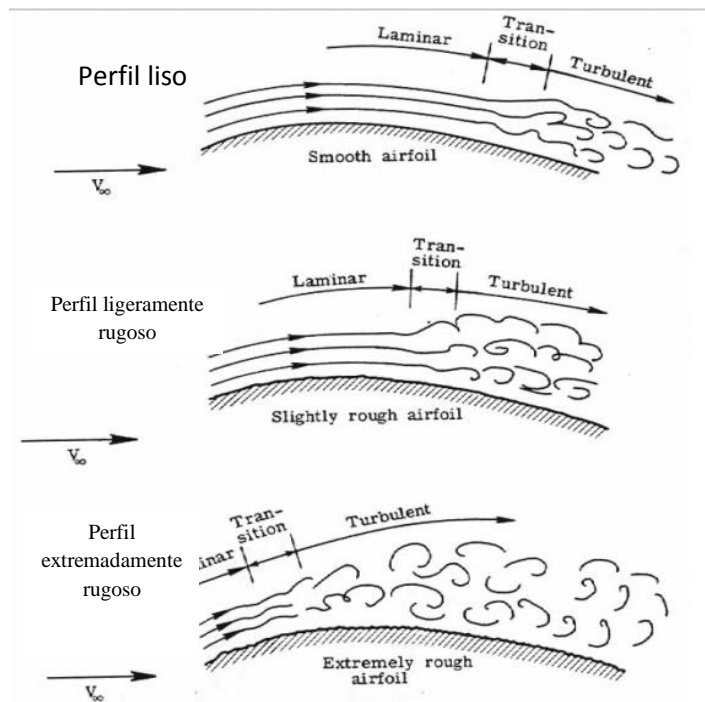
El llamado flujo de Stokes Ilustración 34 representa una esfera de acero lanzada dentro de un contenedor lleno de aceite de silicona pesada, la esfera cae lentamente y la presencia de una alta fuerza viscosa se hace evidente como también el comportamiento del flujo laminar variando a medida que el número Reynolds aumenta. En número Reynolds altos como los que experimenta una aeronave en vuelo se encontrarán flujos tanto laminares como turbulentos.

El efecto de la superficie rugosa de un objeto sumergido en un campo de flujo es el de cambiar un flujo cercano al objeto de laminar a turbulento, si la superficie rugosa aumenta, el primer punto de ocurrencia de un flujo turbulento se moverá con la corriente a lo largo del objeto o en aeronáutica de un perfil alar por ejemplo en la **¡Error! La autoreferencia al marcador no es válida.** se muestra los cambios en el tipo de flujo dado a que cada perfil tiene un grado de rugosidad mayor al anterior pero cabe resaltar que el número Reynolds es el mismo. Se puede decir entonces que la contribución a un flujo laminar o turbulento se debe al número Reynolds y a la rugosidad, y estos no son independientes de uno al otro. Un fenómeno que ocurre

³¹<http://history.nasa.gov>

a bajos números Reynolds es el de mantener el flujo laminar incluso en materiales o superficies rugosas como también en altos números Reynolds el flujo será turbulento incluso si la superficie es altamente lisa.

Ilustración 35 Rugosidad en la superficie y campo de flujo.³²



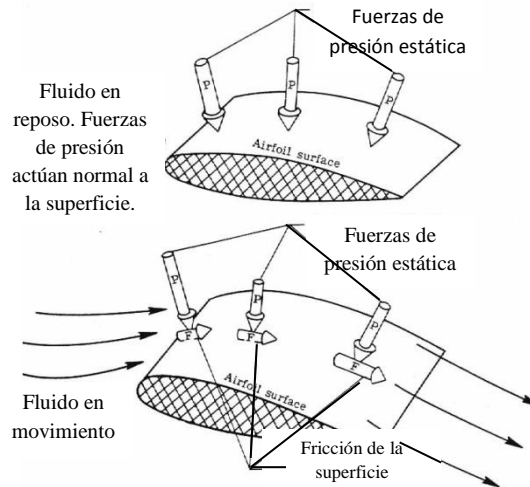
Fuente Tomada de <http://history.nasa.gov> y modificada por el autor.

Un factor importante que se aprecia en la transición de un flujo laminar a turbulento es el gradiente de presiones en el campo de flujo, si la presión estática se incrementa con la distancia corriente abajo el flujo laminar se amplificará y como resultado se verá un flujo turbulento. Ahora si la presión estática disminuye con la distancia corriente abajo las perturbaciones en el flujo laminar tenderán a mantenerse fuera y el flujo a seguir laminar.

Se puede recordar que la presión estática sobre un perfil alar decrece hasta el punto de máximo grosor, y un flujo laminar será fomentado en esta región, después del punto de máximo grosor la presión estática se incrementa por lo tanto el flujo laminar podría tornarse turbulento después del borde de salida.

³² <http://history.nasa.gov/SP-367/chapt3.htm#f32>

Ilustración 36 fuerzas actuantes por fricción, fluido estático y en movimiento.³³



Fuente: 2 Tomada en línea de <Introduction to the aerodynamics of flight sp-367, NASA>

3.5.2. Capa Límite³⁴. Para una mejor visión sobre este tema, se puede apreciar la Ilustración 38 ya que esta muestra una placa delgada y ubicada paralelamente al flujo, se puede ver que el flujo anterior al borde de la placa es de corriente uniforme. Si el fluido fuese ideal, es decir no viscoso, el fluido simplemente se deslizaría sobre la superficie de la placa y la distribución de la velocidad sería uniforme y de valor constante, y esto daría a que no existiera el arrastre por no haber fricción.

La realidad es que todos los fluidos causan algún tipo de arrastre por su naturaleza viscosa obviamente unos más que otros. Esto causa que el fluido adhiera una capa muy delgada a la superficie del objeto (Ilustración 38(b)), se puede apreciar que si en la superficie de la placa en un punto B, la velocidad del flujo es cero, pero a medida que se mueve a lo largo de la placa la velocidad de fluido gradualmente aumenta hasta un punto A, y la velocidad obtiene un valor constante V_{∞} . La capa de fluido donde la velocidad cambia de cero a un valor constante se le denomina CAPA LÍMITE, dentro de la capa límite se encuentran velocidades relativas entre las capas de partículas y la fricción interna.

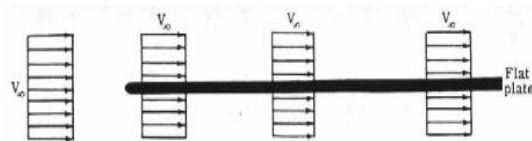
Esta fricción interna se extiende a la superficie del cuerpo, por lo tanto la acumulación de este efecto produce una fuerza de arrastre sobre la placa. Esta fuerza de arrastre se refiere al arrastre por fricción sobre la superficie o piel. Siguiendo con el análisis de la Ilustración 38 (b), cerca al borde de ataque de la placa se encuentra un flujo laminar como también su capa límite, a medida que se

³³ Introduction to the aerodynamics of flight sp-367, NASA

³⁴ En línea [<http://history.nasa.gov/SP-4103/app-f.htm>]

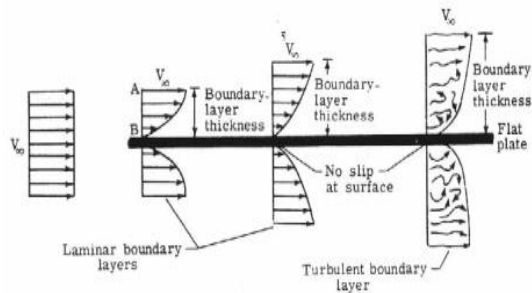
avanza la viscosidad actúa y la capa límite aumenta, y la velocidad disminuye más y más por fricción interna. Eventualmente se alcanza un punto tal donde la capa límite laminar experimenta un cambio y se convierte en turbulento, Ilustración 38(c).

Ilustración 38 Capa límite - fluido viscoso y no viscoso-.



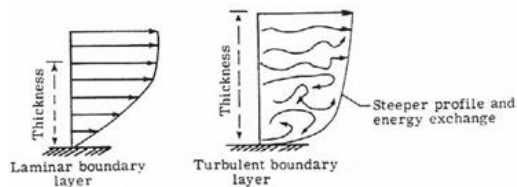
(a) Inviscid flow along a flat plate.

(a). Flujo no viscoso a lo largo de una placa plana.



(b) Viscous flow along a flat plate.

(b). Flujo viscoso a lo largo de una placa plana.



(c) Comparison of laminar and turbulent flow.

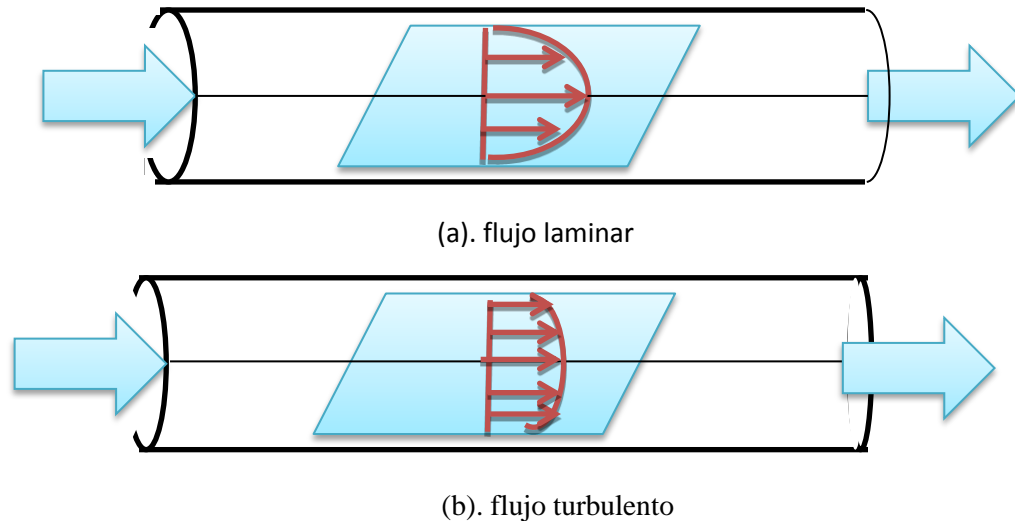
(c). comparación de flujo laminar y turbulento.

Fuente: 3 Tomada en línea de, <http://quest.nasa.gov/aero/planetary/atmospheric/drag1.html>>

El número Reynolds tiene un gran impacto sobre la capa límite ya que a medida que este aumenta ya sea por causa del aumento de velocidad o por la reducción en viscosidad, la capa límite se engrosa más lentamente. Aún con lo anterior la velocidad en la superficie del cuerpo debe ser cero así que la capa límite no desaparece.

3.5.3. Perfiles de Velocidad. La velocidad es un parámetro desigual dentro de ductos, tubos, mangueras o dispositivos que transporten o permitan el flujo de un fluido. Es decir si se secciona por zonas un corte de tubería con un flujo interno se encontrará que la velocidad varía entre estas zonas.

Ilustración 39 Diferencia entre perfiles de velocidad, laminar y turbulento³⁵.



Fuente: Realizada por el autor (tomada y modificada de Mecánica de fluidos de Robert Mott).

La Ilustración 39 muestra la diferencia entre perfiles de velocidad estos se explican detalladamente en el siguiente numeral.

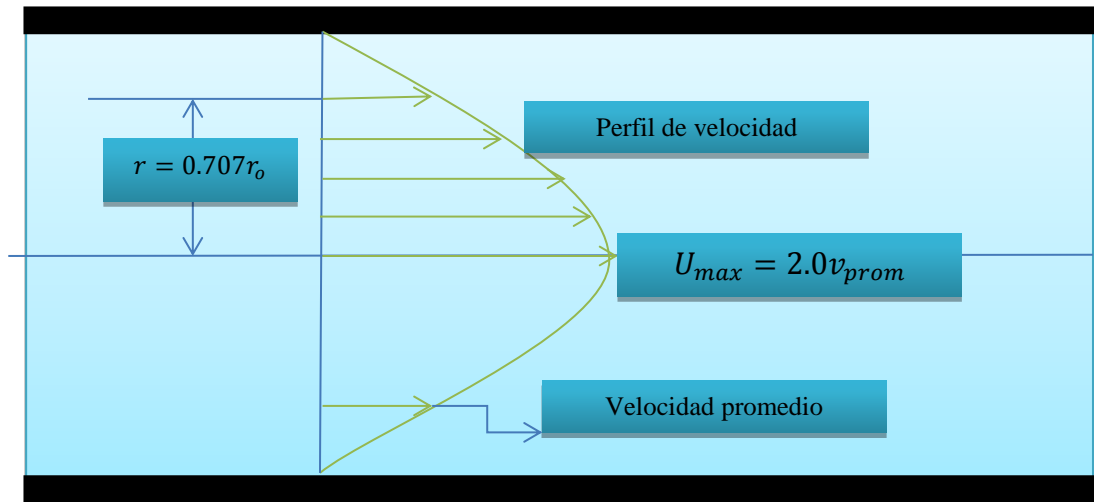
3.5.4. Perfil De Velocidad Flujo Laminar. Existe una ecuación para definir la velocidad local en cualquier punto dentro de una trayectoria de un flujo, usualmente esta velocidad local se denota como U ubicada a un radio r .

Ecuación 38 Velocidad local en cualquier punto. Flujo laminar³⁵.

$$U = 2v \left[1 - \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \right]$$

³⁵ MOTT, Robert L. , Mecánica de fluidos. México: Pearson Educación, 2006. P 257. C9

Ilustración 40. zonas del perfil de velocidades.



Fuente: Realizada por el autor.

La Ilustración 40 muestra en detalle las distintas zonas que construyen el perfil de velocidad en un flujo turbulento, se puede ver que la velocidad promedio se encuentra en un lugar específico y que la velocidad en el centro del perfil es el doble de la velocidad promedio, además que la velocidad en las paredes es cero.

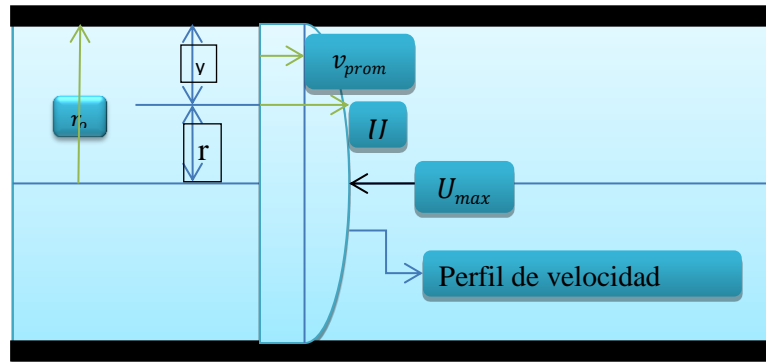
3.5.5. Perfil de velocidad para flujo turbulento. El perfil que se forma en el flujo turbulento difiere a la distribución parabólica del flujo laminar que se aprecia en la Ilustración 40. El perfil de velocidad para flujo turbulento cambia rápidamente de la pared hacia una distribución casi uniforme en la sección transversal.

El factor de fricción f causa que el perfil varíe y este varía con el número Reynolds además de la rugosidad relativa de la tubería.

Ecuación 39 Velocidad local flujo turbulento³⁵.

$$U = v \left[1 + 1.43\sqrt{f} + 2.15\sqrt{f} \log_{10} \left(1 - \frac{r}{r_o} \right) \right]$$

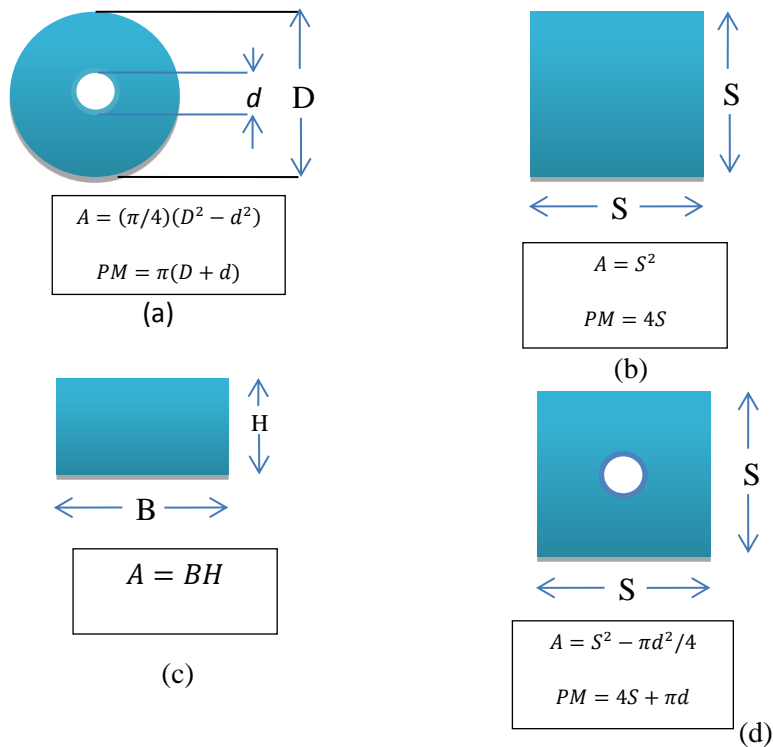
Ilustración 41 Perfil de velocidad flujo turbulento.



Fuente: Realizada por el autor.

3.5.6. Flujo en secciones no circulares³⁶. No siempre los flujos se encuentran en tuberías circulares, aunque estas son las más comunes se encuentran también otros tipos de aplicaciones como los túneles de viento y agua que tienen secciones rectangulares o cuadradas y al igual que los aspectos antes hablados también se aplican a este tipo de secciones.

Ilustración 42 Diferentes secciones transversales no circulares.



Fuente: Modificada por el autor. Mecánica de fluidos de Robert Mott 6ta Edición.

³⁶ MOTT, Robert L. , Mecánica de fluidos. México: Pearson Educación, 2006. P 263. C9

3.5.7. Radio hidráulico³⁶. Usualmente cuando de sistemas hidráulicos se trata, se habla de dimensiones como diámetro o radio por la geometría circular, sin embargo para las secciones que no son circulares para sus secciones transversales se les denomina *radio hidráulico* R , es término puede definirse como el área neta de la sección transversal al flujo en razón al *perímetro mojado* PM de la sección.

Ecuación 40 Radio hidráulico.

$$R = \frac{A}{PM} = \frac{\text{ÁREA}}{\text{PERÍMETRO MOJADO}}$$

Cabe recordar que R es una dimensión longitudinal por lo tanto su unidad será el metro o pie según el sistema que se esté usando. El perímetro mojado PM se refiere a aquellas secciones que se encuentran en contacto con el fluido.

3.5.8. Número de Reynolds para secciones no circulares³⁶. Si un fluido en movimiento llena por completo el área disponible de la sección y se encuentra sujeto a presión, la velocidad promedio puede deducirse de la fórmula que involucra la razón entre el caudal o flujo volumétrico con el área de la sección.

Ecuación 41 Velocidad Promedio

$$v = \frac{Q}{A}$$

Esta velocidad será necesaria para la obtención del número Reynolds tanto para tuberías como para secciones no circulares. La diferencia entre estas dos ecuaciones radica en la implementación del radio hidráulico, es decir se sustituye el diámetro D , con cuatro veces el radio hidráulico R , es decir,

$$R = \frac{A}{PM} = \frac{\frac{\pi D^2}{4}}{\pi D} = \frac{D}{4}$$

Ecuación 42 Equivalencia de diámetro con el radio hidráulico.

$$D = 4R$$

Obteniendo la anterior equivalencia podemos ahora implementarla en la ecuación conocida para hallar el número Reynolds,

Ecuación 43 Número Reynolds para secciones no circulares.

$$N_R = \frac{v(4R)\rho}{\eta} = \frac{v(4R)}{\nu}$$

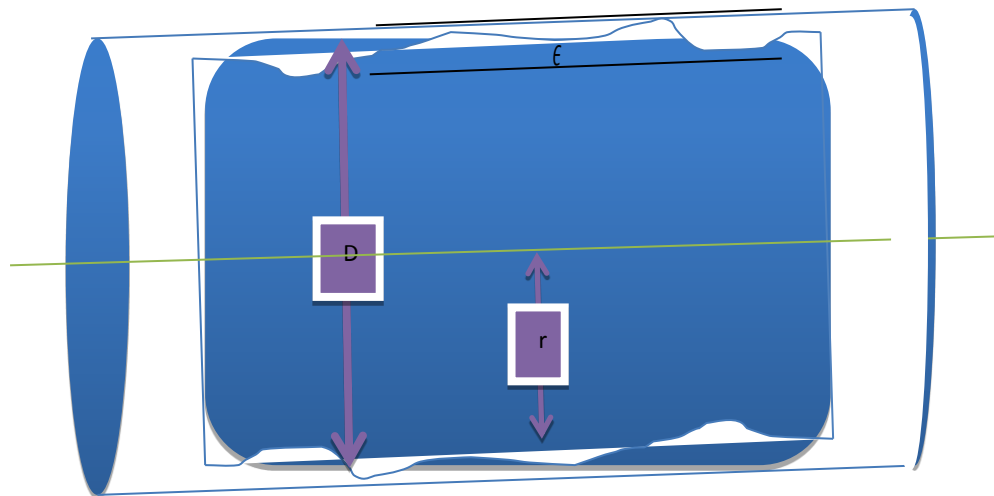
3.6. PÉRDIDAS DE ENERGÍA³⁷

Retomando el tema de pérdidas de energía que se mencionó anteriormente en el tema de ecuaciones de Darcy y pérdidas de energía en flujo laminar, se estudiará sobre las pérdidas de energía en el sistema.

3.6.1. Pérdida de energía flujo turbulento. El flujo turbulento como su nombre lo indica no es organizado, podría decirse que es caótico y que varía constantemente, por lo tanto para tener una referencia se crearon datos experimentales relacionados con el factor de fricción ' f '. Este factor depende del número Reynolds y la rugosidad relativa de la tubería.

3.6.2. Rugosidad relativa. Es la relación del diámetro de la tubería D a la rugosidad promedio de su pared ϵ , claro está que este valor puede variar con el tiempo debido a que muchas tuberías cambian con el paso de los años donde se encuentran acumulaciones en las paredes de las mismas, por tal motivo y para nuestro estudio tomaremos la rugosidad de una tubería nueva y lisa de PVC.

Ilustración 43 Rugosidad en la pared del tubo.



Fuente: Realizada por el autor.

Existen tablas de datos experimentales para la obtención de valores en diferentes materiales;

³⁷ MOTT, Robert L. , Mecánica de fluidos. México: Pearson Educación, 2006. P 278. C9,10

Tabla 10. Coeficientes de diferentes materiales y rugosidad relativa³⁸.

Material	Coeficiente de Manning n	Coef. Hazen-Williams C_H	Coef. Rugosidad Absoluta e (mm)
Asbesto cemento	0.011	140	0.0015
Latón	0.011	135	0.0015
Tabique	0.015	100	0.6
Fierro fundido (nuevo)	0.012	130	0.26
Concreto (cimbra metálica)	0.011	140	0.18
Concreto (cimbra madera)	0.015	120	0.6
Concreto simple	0.013	135	0.36
Cobre	0.011	135	0.0015
Acero corrugado	0.022	--	45
Acero galvanizado	0.016	120	0.15
Acero (esmalado)	0.010	148	0.0048
Acero (nuevo, sin recubrim.)	0.011	145	0.045
Acero (remachado)	0.019	110	0.9
Plomo	0.011	135	0.0015
Plástico (PVC)	0.009	150	0.0015
Madera (duelas)	0.012	120	0.18
Vidrio (laboratorio)	0.011	140	0.0015

Fuente: Tomada de computer applications in hydraulic engineering 5th edition.

Los valores que se encuentran en la Tabla 10 sirven de referencia para cálculos de sistemas de tuberías. Sin embargo para la obtención de otros valores como el factor de fricción se puede emplear el diagrama de Moody-Ilustración 44- este muestra el factor de fricción f versus el número Reynolds N_R donde se encuentran varias curvas paramétricas relacionadas con la rugosidad relativa D/ϵ . En el lado izquierdo se encuentran las curvas para números Reynolds menores a 2000, estas reflejan la relación $f = 64/N_R$ para flujo laminar. Para la región entre 2000 y 4000 como se mencionó anteriormente es la zona crítica, en esta zona no hay curvas, así que se observan curvas después de $N_R = 4000$.

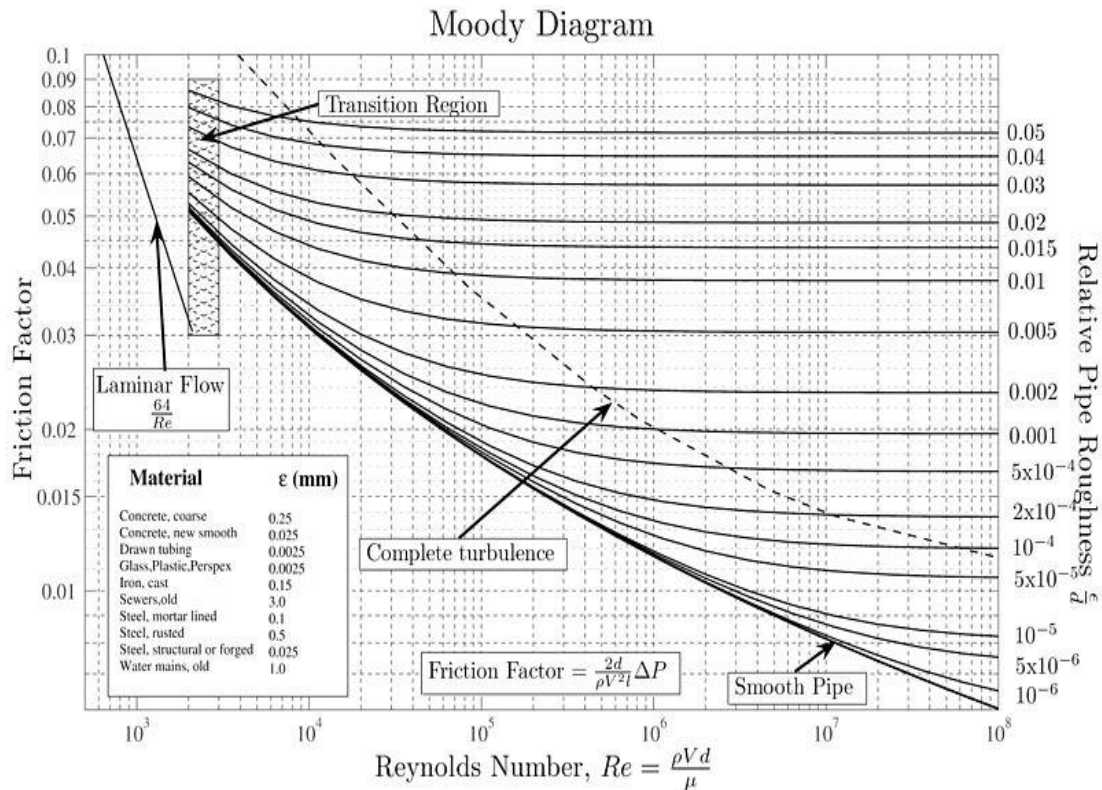
En las curvas del diagrama de Moody se pueden apreciar algunas observaciones importantes como:

- El factor de fricción f disminuye cuando la rugosidad relativa aumenta D/ϵ , en un número de Reynolds dado.
- Para la rugosidad relativa D/ϵ , el factor de fricción disminuye con el aumento del número Reynolds hasta que este alcanza la zona de turbulencia completa.

³⁸Tomada de computer applications in hydraulic engineering 5th edition.

- Una vez se alcanza la zona de turbulencia completa el N_R no tiene ningún efecto sobre el factor de fricción.
- Al incrementarse la rugosidad relativa D/ϵ también se eleva el valor del número Reynolds donde comienza la región de turbulencia completa.

Ilustración 44 Partes del diagrama de Moody.



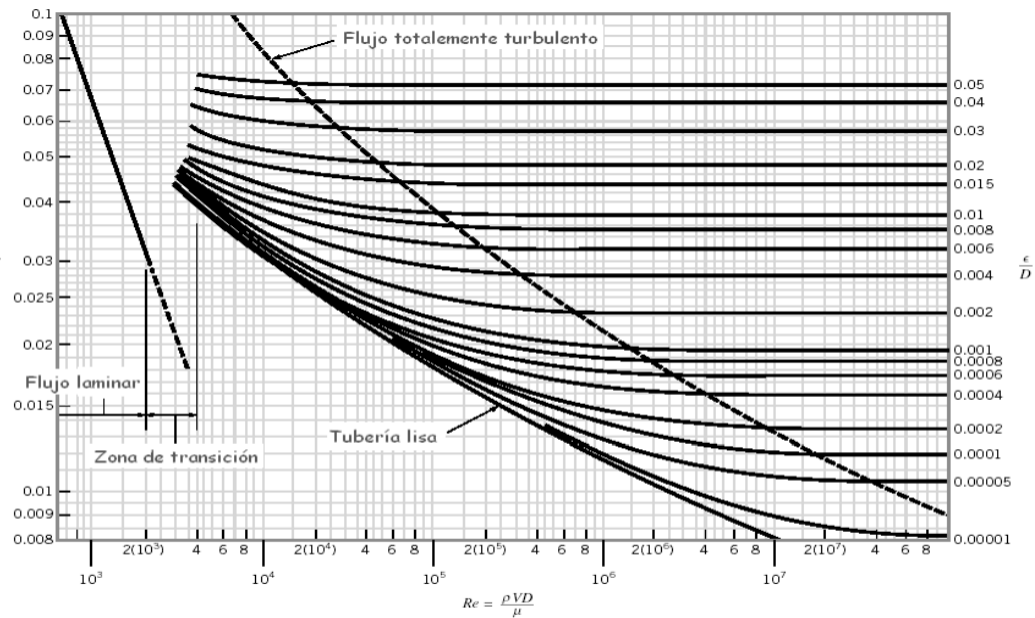
Fuente: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Moody_diagram.jpg

Diagrama de Moody³⁹ -Ilustración 44- para obtención del factor de fricción, conociendo el número Reynolds y la rugosidad relativa.

En el caso de sistemas de PVC se debe tomar la curva de tubería lisa, dado que el PVC tiene una rugosidad bastante baja $1.5 \times 10^{-6} m$.

³⁹ MOTT, Robert L., Mecánica de fluidos. México: Pearson Educación, 2006. P 236. C8

Tabla 11 Diagrama de Moody.



Al conocer los anteriores conceptos como la ecuación de continuidad, factor de fricción, número Reynolds, tipos de flujo (turbulento y laminar), diagrama de Moody entre otros parámetros podemos entonces continuar con el análisis de pérdidas y ganancias de energía como también las presiones que se ocasionan cuando el sistema se encuentra en funcionamiento.

3.6.3. Pérdidas de energía h_L ⁴⁰. Las pérdidas de energía se relacionan estrechamente con los accesorios y tuberías de un sistema. Como vimos anteriormente esto también se debe a la rugosidad del material, y si se sabe dónde estarán ubicados las válvulas, bomba, cambios de diámetro, codos etc., se podrá entonces continuar con el análisis para determinar el total de pérdidas y ganancias de energía como también las presiones causadas por el movimiento en los puntos predeterminados.

El término h_L representa el total de pérdidas en el sistema, es decir es la sumatoria de cada una de las pérdidas locales, por lo tanto se debe calcular las pérdidas en los accesorios y diferentes secciones del sistema en desarrollo.

$$h_L = h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_n \dots$$

El diagrama de Moody -Tabla 11- es una gran herramienta ya que es exacta y conveniente en el caso de realizar cálculos de forma manual, pero existen

⁴⁰ MOTT, Robert L. , Mecánica de fluidos. México: Pearson Educación, 2006. P 281. C10

fórmulas las cuales pueden aplicarse a medios magnéticos para tener resultados automáticos y programables.

Recordando una de estas ecuaciones en la sección de ecuaciones de Darcy se halló la ecuación para el factor de fricción de flujo laminar-Ecuación 36- cabe recordar que se debe usar para flujos que se encuentran por debajo de 2000 en su número Reynolds.

$$f = \frac{64}{N_R}$$

Cuando el flujo se encuentra en el rango de número Reynolds entre 2000 y 4000 es difícil predecir el tipo de flujo y sobre todo el valor del factor de fricción f .

La siguiente ecuación permite hallar el valor de f para flujos turbulentos, está fue presentada por P.K. Swamee y A.K. Jain⁴¹

Ecuación 44 Factor de fricción para flujo turbulento.

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{1}{3.7 \left(\frac{D}{\epsilon} \right)} + \frac{5.74}{N_R^{0.9}} \right) \right]^2}$$

3.6.4. Pérdidas por fricción en secciones transversales no circulares. En los casos donde la geometría de la sección transversal del conducto no es circular y está representada por el radio hidráulico se puede utilizar la ecuación de Darcy para la pérdida de fricción de la siguiente forma;

3.6.5. Pérdidas menores, según el coeficiente de resistencia⁴⁰. Como se vio anteriormente en la **Ecuación 26** donde se halla la pérdida de energía sin embargo no se puntualizó las pérdidas de energía en accesorios. Cabe recordar que las pérdidas de energía son proporcionales a la carga de velocidad del fluido al pasar por un conducto, codo, accesorio de expansión o contracción. En experimentos esto ha dado unos resultados que se reportan en términos de un coeficiente, este se le denomina coeficiente de resistencia K , y se aprecia en la siguiente ecuación:

Ecuación 45 Pérdida menor de energía.

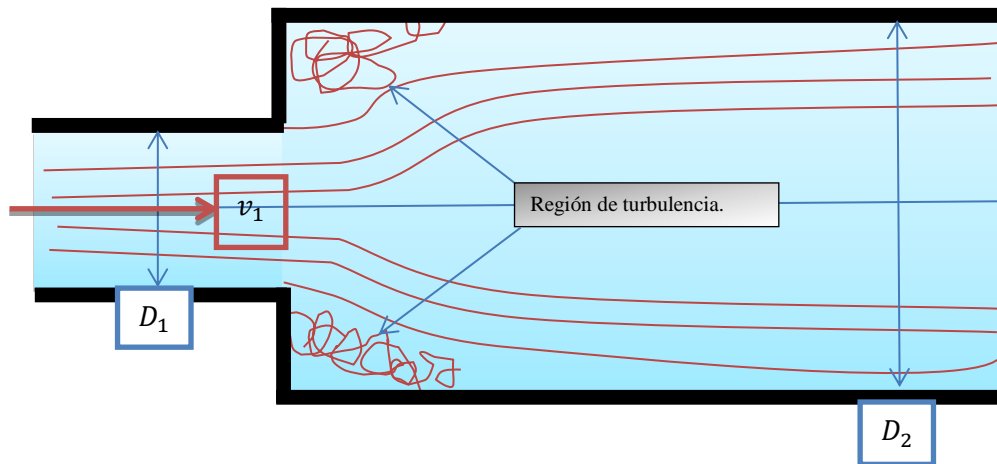
$$h_L = K \left(\frac{v^2}{2g} \right)$$

⁴¹ http://www.mas.bg.ac.rs/istrazivanje/biblioteka/publikacije/Transactions_FME/Volume39/2/04_MJaric.pdf

El coeficiente de resistencia es adimensional ya que es una representación de una constante de proporcionalidad entre la pérdida de energía y la carga de velocidad. La magnitud de K depende de la geometría del dispositivo o accesorio que se esté analizando además que la velocidad del flujo también puede influir en este valor. Por tal motivo a medida que se estudien diferentes accesorios se describirá la forma de hallar el valor de K .

3.6.6. Expansión Súbita⁴⁰. Cuando un fluido en movimiento pasa de un conducto o tubería de cierto diámetro a un diámetro mayor a través de una expansión súbita se genera una disminución de velocidad de forma abrupta ocasionando turbulencias que en sí se traducen como pérdidas de energía. La magnitud de la pérdida de energía depende de la razón de los tamaños o diámetros de los conductos.

Ilustración 45 Accesorio Expansión Súbita.



Fuente: Modificado por el autor, basado en el libro de mecánica de fluidos de Robert Mott.

Para este accesorio la obtención de K se puede realizar por medio de una ecuación propuesta en el libro de mecánica de fluidos de Robert Mott⁴².

Ecuación 46 Coeficiente de resistencia para accesorios de expansión súbita.

$$K = \left[1 - \left(\frac{A_1}{A_2} \right) \right]^2 = \left[1 - \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 \right]^2$$

⁴² Mecánica de fluidos de Robert Mott, Capítulo 10 Pérdidas menores.

Para ubicar apropiadamente los valores en la ecuación cabe resaltar el movimiento del fluido va de una sección pequeña a una más grande por lo tanto los subíndices 1 y 2 corresponden a la dirección del flujo.

3.6.7. Pérdida en la salida de un ducto a un depósito⁴². La pérdida a la salida de un ducto o tubería que lleva una velocidad v y pasa a un tanque o depósito de gran tamaño puede decirse que la velocidad se disipa a cero. Es decir la energía cinética que tiene el fluido en la tubería representada por la carga de velocidad $v^2/2g$. Con esto podemos hallar la pérdida de energía con la siguiente ecuación;

Ecuación 47 Pérdida de energía a la salida.

$$h_L = 1 \left(\frac{v_1^2}{2g} \right)$$

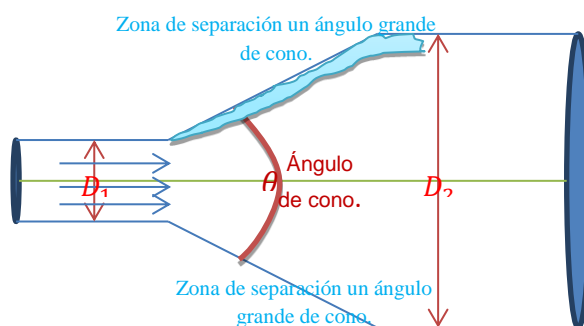
3.6.8. Pérdida en una expansión gradual⁴². Para reducir la pérdida de energía que puede producirse en una expansión súbita hablada anteriormente, existe una expansión que hace la transición de una tubería menor a una grande de forma gradual obteniendo una menor pérdida de energía.

La ecuación establecida para hallar la pérdida de energía para este tipo de accesorio es;

$$h_L = K \left(\frac{v_1^2}{2g} \right)$$

En este caso v_1 es la velocidad promedio de la tubería de menor tamaño antes de ingresar a la siguiente área mayor. El coeficiente de resistencia K depende de la relación D_1/D_2 y del ángulo de cono θ . Ver Tabla 12.

Ilustración 46 Expansión gradual.



Fuente: Realizada por el autor. (Basada en el libro de Robert Mott 6ta edición cap 10)

Tabla 12 Coeficiente de resistencia para expansión gradual.

	ángulo de cono											
D2/D	2°	6°	10°	15°	20o	25o	30o	35o	40o	45o	50°	60°
1,1	0,01	0,01	0,03	0,05	0,1	0,13	0,16	0,18	0,19	0,2	0,21	0,23
1,2	0,02	0,02	0,04	0,09	0,16	0,21	0,25	0,29	0,31	0,33	0,35	0,37
1,4	0,02	0,03	0,06	0,12	0,23	0,3	0,36	0,41	0,44	0,47	0,5	0,53
1,6	0,03	0,04	0,07	0,14	0,26	0,35	0,42	0,47	0,51	0,54	0,57	0,61
1,8	0,03	0,04	0,07	0,15	0,28	0,37	0,44	0,5	0,54	0,58	0,61	0,65
2	0,03	0,04	0,07	0,16	0,29	0,38	0,46	0,52	0,56	0,6	0,63	0,68
2,5	0,03	0,04	0,08	0,16	0,3	0,39	0,48	0,54	0,58	0,62	0,65	0,7
3	0,03	0,04	0,08	0,16	0,31	0,4	0,48	0,55	0,59	0,63	0,66	0,71
∞	0,03	0,05	0,08	0,16	0,31	0,4	0,49	0,56	0,6	0,64	0,67	0,72

Fuente Realizada por el autor información basada en el libro de Mecánica de fluidos de Robert Mott.

Otro forma de definir el accesorio de expansión gradual es el de *difusor* , y la función de este es el de convertir la energía cinética a energía de presión, estas energías se encuentran representadas en la ecuación de continuidad representadas por la carga de velocidad $v^2/2g$ y la carga de presión p/γ respectivamente.

Como la finalidad del difusor es el de reducir pérdidas de energía y el ideal sería que no existieran pérdidas lo que significaría que la presión máxima podría calcularse con la ecuación de Bernoulli -Ecuación 20-,

$$\left(\frac{p_1}{\gamma}\right) + (z_1) + \left(\frac{v_1^2}{2g}\right) = \left(\frac{p_2}{\gamma}\right) + (z_2) + \left(\frac{v_2^2}{2g}\right)$$

En el caso de que el difusor se encuentre ubicado de forma horizontal donde la elevación no varía pueden cancelarse dichos términos y la ecuación quedaría así;

Ecuación 48 Presión en un difusor ideal.

$$\Delta p = p_2 - p_1 = \frac{\gamma(v_1^2 - v_2^2)}{2g}$$

A la ecuación anterior se le conoce como *presión de recuperación*. Sin embargo los difusores reales si tienen pérdidas de energía y debe aplicarse la ecuación de la energía;

$$\left(\frac{p_1}{\gamma}\right) + (z_1) + \left(\frac{v_1^2}{2g}\right) - h_L = \left(\frac{p_2}{\gamma}\right) + (z_2) + \left(\frac{v_2^2}{2g}\right)$$

Por lo tanto el incremento en la presión sería así;

Ecuación 49 Presión en un difusor real.

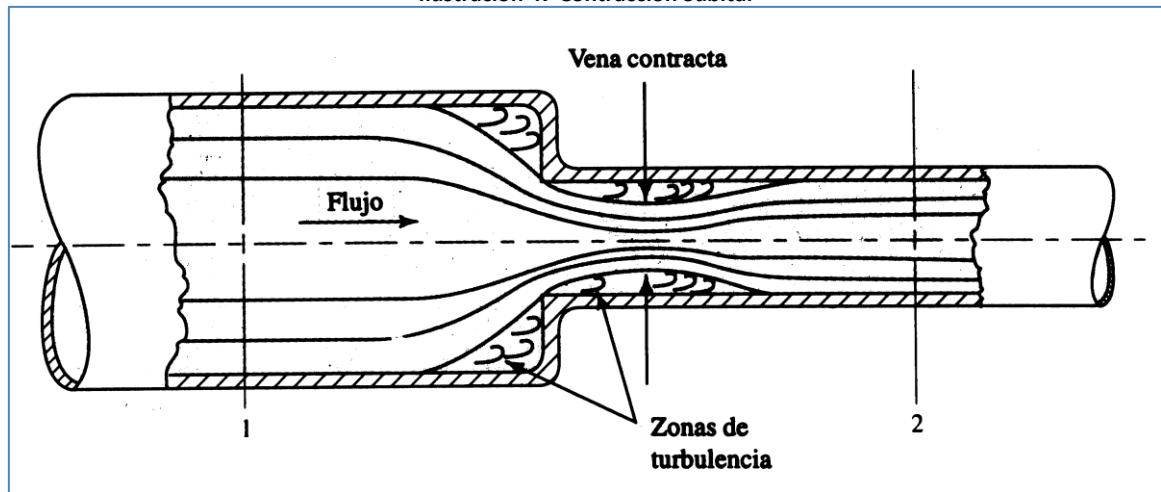
$$\Delta p = p_2 - p_1 = \frac{\gamma(v_1^2 - v_2^2)}{2g} - h_L$$

3.6.9. Contracción Súbita⁴². Al igual que la expansión súbita aplicamos la siguiente ecuación para hallar la pérdida de energía en este accesorio.

Ecuación 50 Pérdida de energía contracción súbita.

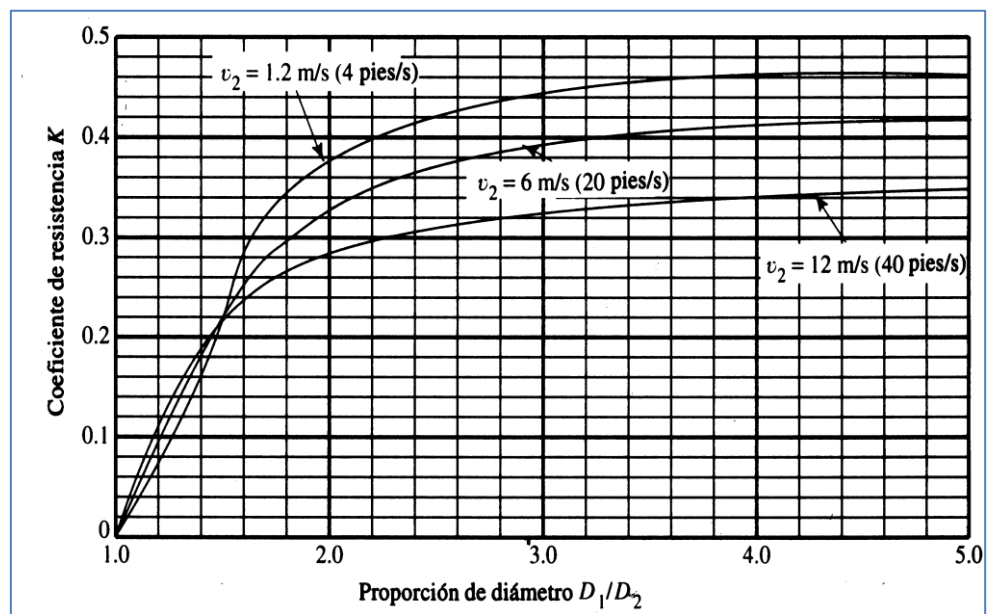
$$h_L = K \left(\frac{v_2^2}{2g} \right)$$

Ilustración 47 Contracción Súbita.



Fuente Tomada del libro de Mecánica de fluidos de Robert Mott.

Tabla 13 Coeficiente de resistencia para contracción súbita



Fuente Tomada del libro de Mecánica de fluidos de Robert Mott.

Tabla 14 Coeficiente de resistencia para contracción súbita.

	velocidad								
D2/D1	.6 m/s	1.2m/s	1.8m/s	2.4m/s	3m/s	4.5m/s	6m/s	9m/s	12m/s
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.1	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.06
1.2	0.07	0.07	0.07	0.07	0.08	0.08	0.09	0.1	0.11
1.4	0.17	0.17	0.17	0.17	0.18	0.18	0.18	0.19	0.2
1.6	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.25	0.25	0.25	0.24
1.8	0.34	0.34	0.34	0.33	0.33	0.32	0.31	0.29	0.27
2	0.38	0.37	0.37	0.36	0.36	0.34	0.33	0.31	0.29
2.2	0.4	0.4	0.39	0.39	0.38	0.37	0.35	0.33	0.3
2.5	0.42	0.42	0.41	0.4	0.4	0.38	0.37	0.34	0.31
3	0.44	0.44	0.43	0.42	0.42	0.4	0.39	0.36	0.33
4	0.47	0.46	0.45	0.45	0.44	0.42	0.41	0.37	0.34
5	0.49	0.47	0.47	0.46	0.45	0.44	0.42	0.38	0.35
10	0.49	0.48	0.48	0.47	0.46	0.45	0.43	0.4	0.36
∞	0.49	0.48	0.48	0.47	0.47	0.45	0.44	0.41	0.38

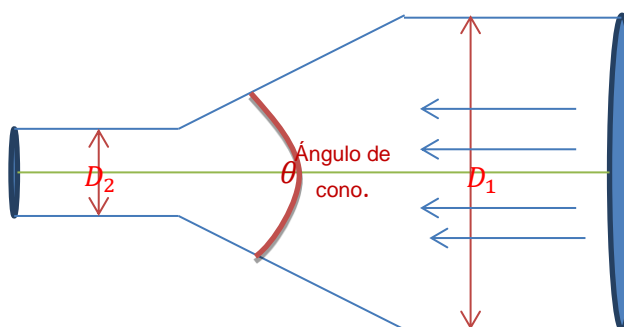
Fuente: Realizada por el autor información basada en el libro de Mecánica de fluidos de Robert Mott.

3.6.10. Contracción gradual. En la contracción gradual se busca que el ángulo de cono θ se encuentre entre los 15° y 40° si el objetivo es perder la menor cantidad de energía posible. La ecuación para hallar la magnitud de la pérdida de energía es la misma vista en la Ecuación 50.

$$h_L = K \left(\frac{v_2^2}{2g} \right)$$

Ilustración 48 Accesorio- contracción gradual.

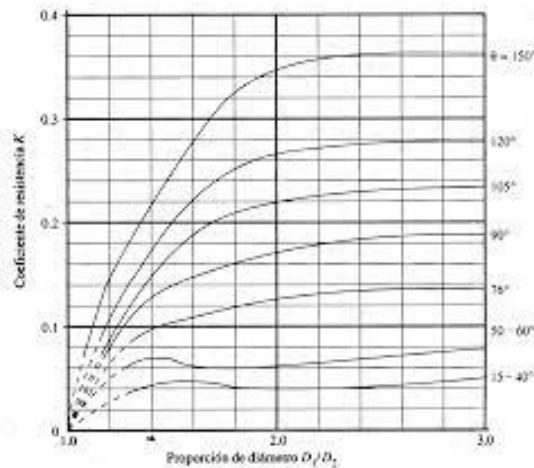
Ilustración 48 Accesorio- contracción gradual.



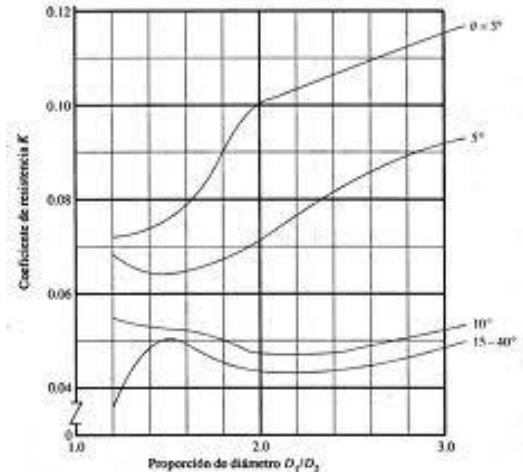
Fuente Realizada por el autor.

Igualmente la velocidad promedio es la del diámetro más pequeño después de la contracción. El coeficiente de resistencia puede aumentar si el ángulo de cono es menor a 15° .

Tabla 15 Coeficiente de resistencia, contracción gradual con ángulo (a) $\theta \geq 15^\circ$, (b) $\theta < 15^\circ$.



a).

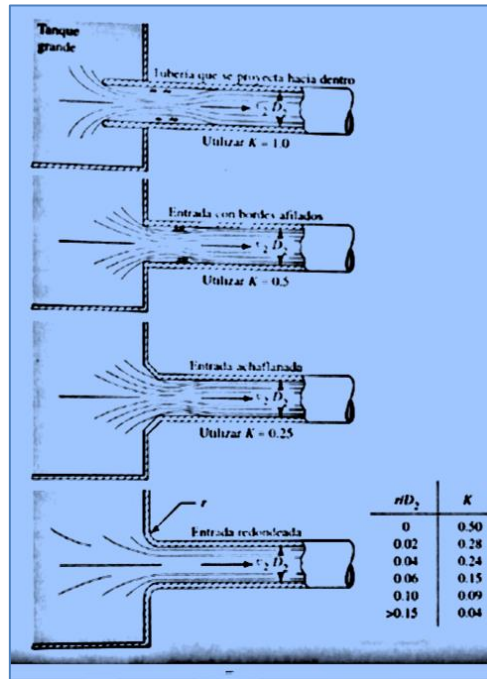


b).

3.6.11. Pérdida en la entrada. En este caso el fluido que se encuentra en movimiento y su desplazamiento viene de un depósito de gran tamaño donde su velocidad es mínima este flujo debe acelerar para adecuarse al nuevo ducto o tubería que tiene un diámetro mucho más pequeño. Por lo tanto la facilidad con la que acelera el flujo se debe a la magnitud de la pérdida de energía. Es decir el coeficiente de resistencia depende de la geometría de la entrada.

Aunque la ecuación para calcular la pérdida de energía es la misma vista anteriormente, el coeficiente de resistencia según experimentos varía según la geometría, por lo tanto se encuentra una tabla con algunas posibles entradas a tuberías y su respectivo coeficiente K . Ilustración 49.

Ilustración 49 Coeficientes de resistencia de entradas.



Fuente Tomada del libro de Mecánica de fluidos de Robert Mott.

3.6.12. Longitud equivalente y Coeficientes de resistencia para válvulas y acoples⁴³. Existen varias clases de accesorios como válvulas y acoplamientos de diferentes clases y fabricantes. Las válvulas se utilizan para controlar el flujo de fluido, estas pueden ser:

- Globo
- Ángulo
- Compuerta
- Mariposa
- De verificación
- Otras para distintos objetivos.

Los acoplamientos se utilizan para re direccionar el flujo o cambiar el tamaño de la tubería, estos pueden ser:

- Codos de varios diseños y ángulos.
- Acople tipo T.
- Reductores.
- Boquillas.
- Orificios.

⁴³ MOTT, Robert L. , Mecánica de fluidos. México: Pearson Educación, 2006. P 282. C10

La pérdida de energía que se produce en las válvulas y acoplamientos se calcula con la ecuación común vista anteriormente Ecuación 26, sin embargo se debe calcular primero el coeficiente de resistencia K por lo tanto;

Ecuación 51 Coeficiente de resistencia para acoplamientos y válvulas.

$$K = \left(\frac{L_e}{D} \right) f_T$$

$$\text{Coef. de resistencia} = \frac{\text{Longitud equivalente}}{\text{Diámetro}} \text{ factor de fricción a la tubería conectada.}$$

En la Tabla 16 Longitud equivalente en diámetros de tubería. se encuentran los valores considerados constantes correspondientes de la relación de longitud equivalente (L_e/D). La **longitud equivalente L_e** es la longitud de una tubería recta y de mismo diámetro nominal que el de la válvula en análisis, por lo que tendría la misma resistencia. D Es el diámetro interior real de la tubería. El factor de fricción en la que está conecta la válvula o acoplamiento a la tubería se representa por f_T y se asume que se encuentra en la zona de turbulencia completa, es decir maximiza el valor de pérdida de energía. Los valores de f_T varía según el tamaño de la tubería y de la válvula o acople variando también el valor de K . Se debe usar el diagrama de Moody para poder determinar el valor de fricción correspondiente.

Tabla 16 Longitud equivalente en diámetros de tubería.⁴⁴

TIPO	LONGITUD EQUIVALENTE L / D
Válvula de globo----- Completamente abierta	340
Válvula de ángulo----- Completamente abierta	150
Válvula de compuerta ----Completamente abierta	8
----- ¾ abierta	35
----- ½ abierta	160
----- ¼ abierta	900
Válvula de verificación-----tipo giratorio	100
Válvula de verificación-----tipo de bola	150
Válvula de mariposa-----completamente abierta	45
Codo estándar de 90°	30
Codo de radio largo de 90°	20
Codo de calle de 90°	50
Codo estándar de 45°	16
Codo de calle de 45°	26
Codo de devolución cerrada	50
Te estándar-----con flujo a través de un tramo	20
Te estándar-----con flujo a través de una rama	60

Fuente: Tomada en línea <http://www.monografias.com/trabajos90/analisis-experimental/analisis-experimental.shtml>.

⁴⁴ Fuente: <http://www.monografias.com/trabajos90/analisis-experimental/analisis-experimental.shtml>.

Pasos para cálculo de pérdidas de energía en accesorios.

- Encontrar $\left(\frac{L_e}{D}\right)$ para la válvula o acoplamiento.
- Determinar la rugosidad de la tubería ϵ .
- Calcular D/ϵ .
- Emplear el diagrama de Moody para determinar el f_T (zona de turbulencia).
- Calcular $K = f_T \left(\frac{L_e}{D}\right)$.
- Calcular $h_L = K \left(\frac{v_p^2}{2g}\right)$, v_p es la velocidad de flujo en el tubo.

3.6.13. Resumen de pérdidas y tuberías en serie⁴⁵. Como resumen se puede comenzar por la ecuación de energía -Ecuación 30- donde se utiliza como referencia la superficie del depósito.

$$\frac{p}{\gamma} + z + \frac{v_1^2}{2g} + h_A - h_L = \frac{p}{\gamma} + z + \frac{v_2^2}{2g}$$

El diagrama ilustra la ecuación de energía entre dos puntos en un sistema de tuberías. A la izquierda, la energía del fluido en el punto 1 se compone de tres términos: $\frac{p}{\gamma}$ (Carga de presión), z (Carga de elevación) y $\frac{v_1^2}{2g}$ (Carga de velocidad). Estos tres términos están agrupados por una llave y etiquetados como 'Energía del fluido punto 1'. En el centro, la energía adicional de la bomba se representa como h_A , y las pérdidas de energía total de la bomba se representan como h_L . A la derecha, la energía del fluido en el punto 2 se compone de los mismos tres términos: $\frac{p}{\gamma}$, z y $\frac{v_2^2}{2g}$, agrupados por una llave y etiquetados como 'Energía del fluido punto 2'. Las flechas indican el flujo de energía desde el punto 1, a través de la bomba y las pérdidas, hacia el punto 2.

La expresión h_L representa la energía total perdida en el sistema en cualquier lugar del sistema utilizando la superficie como referencia, y existen varios factores que contribuyen a la magnitud de h_L , generalizando las pérdidas comunes son:

- h_L = Pérdida total de energía por unidad de peso.
- h_1 = Pérdida en la entrada.
- h_2 = Pérdida por fricción en la línea de succión.
- h_3 = Pérdida de energía en la válvula.
- h_4 = Pérdida de energía en los codos a 90°

⁴⁵ MOTT, Robert L. , Mecánica de fluidos. México: Pearson Educación, 2006. P 282. C11

- $h_5 = \text{Pérdida por fricción en la línea de descarga.}$
- $h_6 = \text{Pérdida en la salida.}$

3.7. FÓRMULAS DE HAZEN –WILLIAMS PARA EL FLUJO DE AGUA⁴⁶

Esta fórmula de Hazen-Williams es una opción alterna a la ecuación de Darcy, aunque esta ecuación se aplica para todo tipo de fluido newtoniano se puede usar la de Hazen- Williams (H&W) con énfasis en flujos de agua, además que es bastante usada para diseño y análisis de sistemas hidráulicos.

La fórmula tiene algunas limitantes como las siguientes:

- Aplicación solo para flujos de agua en tuberías mayores a 2"pulgadas y menores de 6'pies.
- La velocidad no debe exceder los 10ft/s.
- La temperatura ideal para los cálculos son 60°F. su utilización a diferentes temperaturas a esta puede resultar en errores.
- Las ecuaciones deben aplicarse según el sistema de unidades que se esté usando.

Por ejemplo para hallar la velocidad promedio se aplica la siguiente ecuación para el sistema inglés;

Ecuación 52 H&W. Velocidad Promedio sistema inglés.

$$v = 1.32C_h R^{0.63} S^{0.54}$$

$$v = \text{Velocidad promedio} \left(\frac{ft}{s} \right).$$

$C_h = \text{Coeficiente de Hazen – Williams (adimensional).}$

$R = \text{Radio hidráulico del conducto. (ft).}$

$$s = \text{Relación} \frac{h_L}{L} = \frac{\text{pérdida de energía}}{(\text{longitud del conducto})}$$

Se puede apreciar en la ecuación anterior que el término C_h aparece, este se utiliza para categorizar la condición de la superficie de la tubería del sistema. Pueden ser tuberías nuevas y limpias, o tuberías promedio dándole un valor de diseño un poco menor, esto se aprecia en la siguiente tabla,

⁴⁶ MOTT, Robert L. , Mecánica de fluidos. México: Pearson Educación, 2006. P 245. C8

Tabla 17 Coeficiente de Hazen-Williams (H&W) Ch.

Material de tubería	Ch Promedio tuberías nuevas y limpias.	Ch Valor de diseño.
Acero, hierro dúctil	150	140
Plástico, cobre, latón Vidrio	140	130
Acero, hierro fundido, sin recubrimiento.	130	100
Concreto	120	100
Acero corrugado	60	60

La fórmula de H&W se puede ver en otras formas para hallar otros términos como caudal, pérdidas de energía, diámetros y velocidad promedio. La siguiente tabla muestra estas opciones tanto en sistema inglés como el internacional.

Tabla 18 Diferentes alternativas de la fórmula Hazen-Williams.⁴⁷

Sistema inglés	Sistema internacional
$v = 1.32C_h R^{0.63} s^{0.54}$	$v = 0.85C_h R^{0.63} s^{0.54}$
$Q = 1.32AC_h R^{0.63} s^{0.54}$	$Q = 0.85AC_h R^{0.63} s^{0.54}$
$h_L = L \left[\frac{Q}{1.32AC_h R^{0.63}} \right]^{1.852}$	$h_L = L \left[\frac{Q}{0.85AC_h R^{0.63}} \right]^{1.852}$
$D = \left[\frac{2.31Q}{C_h s^{0.54}} \right]^{0.380}$	$D = \left[\frac{3.59Q}{C_h s^{0.54}} \right]^{0.380}$

En la Tabla 19 se muestra un ejemplo donde la tubería es de acero de 6" pulgadas cédula 40, con un $C_h = 100$, $s = \frac{h_L}{1000ft} = 20$, y estos datos nos dan un resultado de $velocidad\ permisible = \frac{4.3ft}{s}$.

⁴⁷ Mecánica de fluidos de Robert Mott

Las siguientes definiciones aplican para la tabla 18,

v = Velocidad promedio del flujo.

C_h = Coeficiente de Hazen – Williams

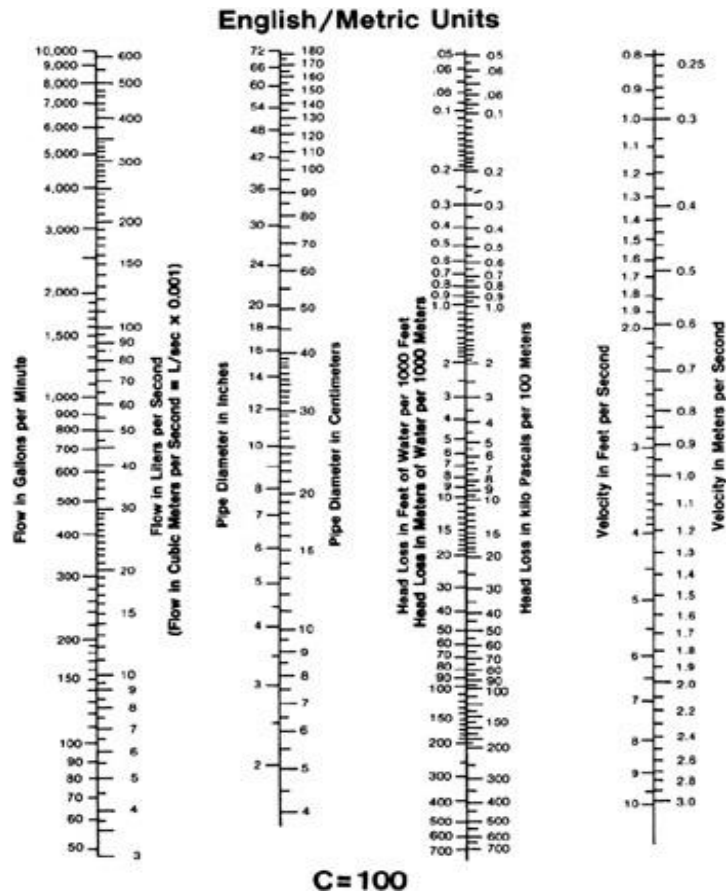
R = Radio hidráulico del conducto de flujo.

s = Relación $\frac{h_L}{L}$; $\frac{\text{pérdida de energía}}{\text{longitud del conducto}}$

Q = flujo volumétrico = Av

Existe además de la fórmula H&W un nomograma que es muy útil para diseño cuando se tiene un caudal predeterminado, este nomograma además limita la pérdida de energía a un valor específico.

Tabla 19 Nomograma de Hazen-Williams con $C_h=100$



Fuente <http://mecanicafluidosfcquach.blogspot.com/2013/04/nomograma-de-hazen-williams.html>

4. FUENTE DE MOVIMIENTO.

Las bombas son dispositivos que se usan para impulsar líquidos, es decir agregan energía al sistema. Cabe resaltar que las pérdidas de energía y las presiones en la tubería pueden cambiar dado a que las bombas pueden variar sus características, por ejemplo podemos tener una bomba que tenga un caudal mayor o menor que una bomba predeterminada, esto ocasiona que haya cambios en velocidad por lo que a su vez se generan cambios en los valores de pérdida de energía del circuito del sistema.

4.1. POTENCIA REQUERIDA POR LAS BOMBAS⁴⁸

Usualmente la potencia comúnmente se conoce como la rapidez que se realiza un trabajo, sin embargo cuando de mecánica de fluidos se trata se le considera como la rapidez con la que se transfiere energía.

Para poder determinar que potencia transmite una bomba a un fluido, debe determinarse cuantos Newton de fluido pasan por la bomba en un tiempo determinado. Esta acción se le conoce como *flujo en peso* W . - Tabla 4- . Donde $W = \gamma Q$ por lo tanto sus unidades son N/s o lb/s , según el sistema utilizado.

La potencia se calcula al multiplicar la energía transferida por newton de fluido h_A y el flujo en peso W .

Ecuación 53 Adición de potencia por una bomba.

$$P_A = h_A W$$

Como $W = \gamma Q$, podemos reemplazar en la Ecuación 53 y obtenemos;

$$P_A = h_A \gamma Q$$

$P_A =$ Potencia que se agrega al fluido.

$\gamma =$ Peso específico.

$Q =$ flujo volumétrico del fluido.

$h_A =$ Energía agregada.

⁴⁸ MOTT, Robert L. , Mecánica de fluidos. México: Pearson Educación, 2006. P 383. C13

Para los cálculos de potencia puede tenerse en cuenta las siguientes equivalencias⁴⁸;

$$1hp = \frac{550lbft}{s} = 745.7W$$

$$\frac{1lbft}{s} = 1.3545W$$

Una forma de encontrar h_A es despejándola de la ecuación de energía una vez se haya obtenido h_L . Puede decirse que h_A es el conjunto total de tareas que debe realizar la bomba para el sistema, en general debe subir la presión del fluido, elevarlo a una altura determinada, aplicar una velocidad al fluido, y la más importante que pueda compensar las pérdidas de energía que se producen en el sistema debido a la fricción.

Ecuación 54 Adición de energía en el sistema.

$$h_A = \frac{p_2 - p_1}{\gamma} + z_2 - z_1 + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + h_L$$

4.1.1. Eficiencia mecánica de las bombas. La relación de la potencia transmitida por la bomba al fluido y la potencia suministrada a la bomba se le denomina *eficiencia*. esta relación se hace por causa de que la potencia suministrada por la bomba no es la misma potencia que se transmite al fluido debido a las pérdidas de energía por fricción mecánica en los componentes de la bomba, fricción del fluido y turbulencias. Así que para medir esta relación existe la eficiencia mecánica e_M ;

$$e_M = \frac{\text{potencia transmitida al fluido}}{\text{potencia de entrada a la bomba}}$$

$$e_M = \frac{P_A}{P_I}$$

La magnitud de la eficiencia mecánica siempre será menor a 1, por lo que se toma como porcentaje de eficiencia, es decir 1 sería el 100% de eficiencia si el sistema fuera ideal. Los fabricantes usualmente proporcionan los datos de rendimiento y en estos puede encontrarse la eficiencia.

4.1.2. Parámetros para selección de bombas. Para prevenir problemas en el sistema, hay que tener en cuenta una serie de conceptos y parámetros que se deben de tener en cuenta a la hora de seleccionar la bomba adecuada.

Algunos parámetros para la selección de la bomba son:

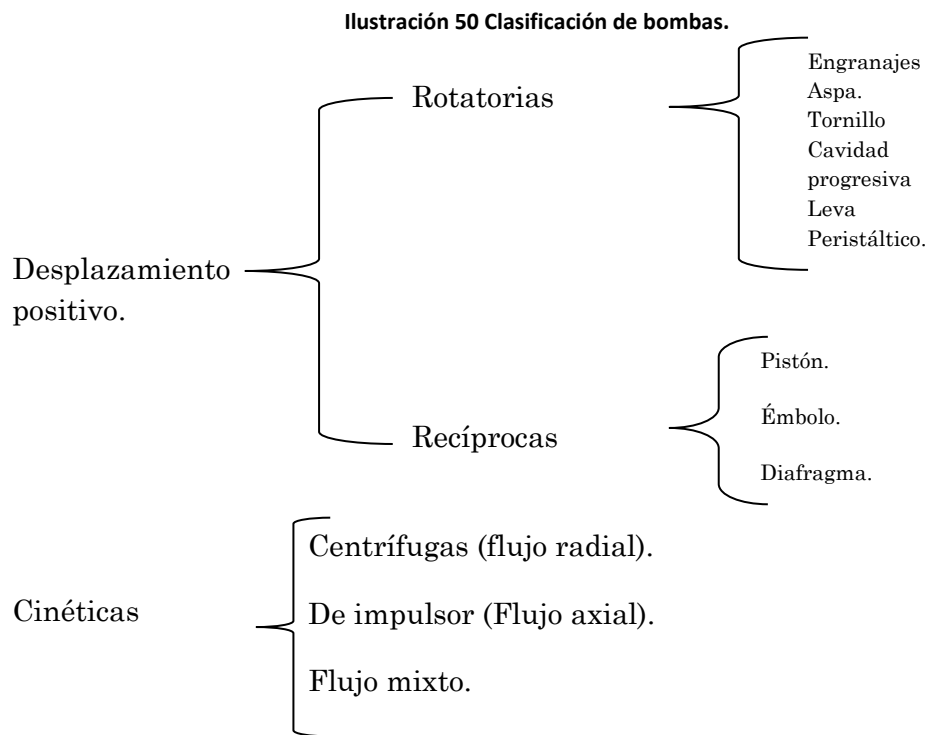
- El tipo de fluido.
- Capacidad requerida (flujo volumétrico).
- Condiciones de la línea de succión.
(Entrada de la bomba).
- Condiciones de la línea de descarga.
(Salida de la bomba).
- Carga total sobre la bomba h_a .
(Ecuación de la energía).
- Tipo de sistema.
(Recircular, abierto, cerrado, etc.).
- Tipo de fuente de potencia.
(Motor eléctrico, diesel, turbina de vapor, otros)
- Limitaciones dimensionales.
- Condiciones ambientales.
- Costo de la bomba. (Compra e instalación).
- Costo operacional.

Las características del fluido y de operación del sistema son fundamentales ya que estas pueden ocasionar daños con el tiempo a la bomba. Algunas de estas características son temperatura, condiciones de bombeo, gravedad específica, viscosidad y la presión de vapor a la temperatura de bombeo.

La **presión de vapor** aumenta a medida que se incrementa la temperatura del líquido. Una recomendación que se encuentra en algunos libros de mecánica de fluidos es la importancia de la presión del fluido a la entrada de la bomba donde ésta debe ser lo suficientemente alta para garantizar la ausencia de cavitación.

4.2. TIPOS DE BOMBAS⁴⁸

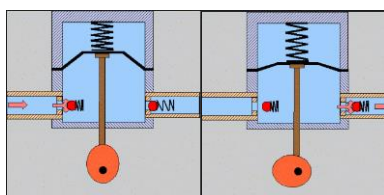
Usualmente se encuentran clasificadas las bombas como desplazamiento positivo o cinéticas. Entre esta clasificación también se encuentran las bombas con orientación específica como horizontales, verticales y en línea. Algunas incluso se clasifican por el tipo de impulsor dado a que estos pueden venir con diferentes configuraciones de acoplamiento como el acoplamiento alejado, cercano, o de impulso magnético como también por su diseño mecánico (soportes, instalación, rodamientos, etc.).



Fuente Realizada por el autor, basada en la información del libro de Mecánica de fluidos Robert Mott.

4.2.1. Bombas de desplazamiento positivo⁴⁸. Este tipo de bomba lo que intenta es enviar una cantidad fija de fluido en cada revolución del rotor o eje impulsor de la bomba. La capacidad de la bomba puede verse afectada por cambios de presión debidos muchas veces al mismo diseño, como la carcasa, rotores, pistones, aspas entre otros componentes o partes activas. Una de las ventajas de este tipo de bomba es que su rango de líquidos es amplio por lo que puede manejar varios tipos de viscosidades.

Ilustración 51 Ejemplo de operación de una bomba de desplazamiento positivo.⁴⁹



Fuente Tomada en línea de <http://www.sabelotodo.org>.

4.2.2. Bombas Cinéticas. Este tipo de bomba agrega energía al sistema o al fluido cuando este se acelera gracias a la rotación del impulsor. El fluido llega al centro del impulsor, este al girar por acción del movimiento y del fenómeno de centrifugación el fluido es lanzado hacia afuera por las aspas y utilizando una voluta para la descarga esto para ayudar a adquirir un poco más de presión de fluido.

Ilustración 52 Partes de una bomba centrífuga.¹⁸



Fuente Tomada en línea de <http://www.sabelotodo.org/aparatos/bombasimpulsion.html>.

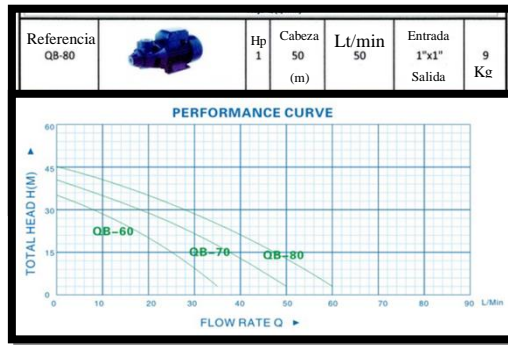
La bomba que se adecua para poder desarrollar algunos tipos de piscinas y estanques está clasificada dentro de las bombas centrífugas y puede encontrarse

⁴⁹ En línea (<http://www.sabelotodo.org>).

como bomba vertical de turbina, estas usualmente cuentan con un motor integrado, es decir se ve como una sola pieza.

4.2.3. Datos De Rendimiento De Bombas Centrífugas. Las bombas centrífugas al no ser de desplazamiento positivo, dependen fuertemente entre la capacidad y la presión que puedan desarrollar. Esto causa que medir en realidad el rendimiento sea un poco complicado, por lo tanto se busca graficar la carga total de la bomba versus la capacidad de descarga o caudal. La siguiente gráfica se obtiene de la fábrica directamente.

Ilustración 53 bomba ejemplo. Gráfica de carga total versus caudal.⁵⁰



Fuente Tomada en línea de <http://www.murchisonpower.com/qb-eletric-clean-water-pump/>

4.2.4. Carga Estática Total. La bomba debe llevar el fluido a la elevación destino, aunque en algunos sistemas son recirculares y su depósito es el mismo destino, se puede tomar como si estuvieran separados y la bomba debe mantener las presiones de los diferentes puntos del sistema, este punto en si se le denomina carga estática total h_o , por lo tanto para obtener este término se puede obtener de la ecuación de la energía. La bomba debe desarrollar una carga igual a la diferencia de carga de presión entre los puntos tomados de referencia sumados a la diferencia de carga de elevación antes de que se cree algún flujo.

Ilustración 54 carga estática total.

$$h_a = \frac{p_2 - p_1}{\gamma} + (z_2 - z_1)$$

Con la anterior ecuación podríamos hallar la carga estática total y nos daríamos cuenta que esta daría próxima a cero si es un sistema recircular donde su inicio y final es el mismo lugar, claro está que en sistema más grandes y complejas donde la longitud de la tubería es considerable se encuentran más pérdidas de energía lo

⁵⁰<http://www.murchisonpower.com/qb-eletric-clean-water-pump/>

que aumentaría la carga sobre la bomba, el concepto en esto está en que las pérdidas de energía son proporcionales a la carga de presión en la tubería, y aumentan con el flujo volumétrico.

4.2.5. Carga de succión neta positiva (NPSH)⁵¹. Un aspecto de suma importancia cuando se escoge una bomba es garantizar que la condición del fluido que entrará a la bomba sea apropiada para mantener un flujo completo de fluido. Un factor que prima para que lo anterior se cumpla es la presión del fluido en la entrada de la bomba. En el diseño del sistema se debe tener en cuenta que la presión debe ser la suficiente para evitar que se formen burbujas de vapor dentro del fluido que se encuentra en movimiento, este fenómeno se le denomina cavitación. La tendencia para que este fenómeno exista depende de la naturaleza o propiedades del fluido como la temperatura y presión en la entrada de la bomba.

4.2.6. Cavitación. Si en la entrada de la bomba la presión es demasiado baja pueden formarse burbujas en el fluido. Este fenómeno de “ebullición” se da en los fluidos a diferentes temperaturas y presiones, características que se relacionan fuertemente en el momento de producir las burbujas en el fluido. La temperatura y presión se vinculan con la altura donde se encuentra el sistema, es decir el punto de ebullición del agua no es el mismo a nivel del mar como al nivel de una ciudad que quede sobre una cordillera.

Si hablamos de una altitud de 0m (nivel del mar) la presión promedio es de 101kPa y la temperatura para hervir a tal altitud y presión es de 100°C, pero por otro lado a una altitud de 2600m nivel de la ciudad de Bogotá, la presión promedio es de 73.759kPa por lo tanto la temperatura de ebullición es de 91.16°C aproximadamente.

Con el anterior ejemplo podemos visualizar este fenómeno en la entrada de la bomba, donde el dispositivo podría tomar un fluido desde abajo sumado a las pérdidas que se pueden generar en el circuito de la tubería y accesorios, se puede generar una presión lo suficientemente baja para generar burbujas de vapor en el fluido.

Ilustración 55 cavitación.⁵²



Fuente Tomada en línea de <http://ingenieros2011unefa.blogspot.com/>.

⁵¹ MOTT, Robert L. , Mecánica de fluidos. México: Pearson Educación, 2006. P 411. C13

⁵² <http://ingenieros2011unefa.blogspot.com/>

Cuando el fluido se encuentra en movimiento e ingresa a la bomba en su parte de succión en el núcleo del impulsor donde este se encuentra rotando ocasionando la aceleración del fluido hacia fuera en dirección de la carcasa o voluta, a este punto lo normal es que la presión aumente sin embargo si se hubiesen formado burbujas de vapor en la parte de succión debido a una presión demasiado baja, estas burbujas colapsarían cuando alcanzaran la parte de mayor presión. Este colapso libera grandes cantidades de energía causando daño a las aspas del impulsor. Cuando este fenómeno de cavitación ocurre el rendimiento de la bomba se degrada con gran notoriedad además de emitir sonidos fuertes e inusuales de la bomba en operación.

La cavitación en sí es un efecto hidrodinámico cuando un fluido en estado líquido tiene una gran velocidad y pasa por algún tipo de restricción o arista afilada causando una variación brusca de presión (descompresión) donde se puede ver reflejada la aplicación de la ecuación de Bernoulli, allí donde este fenómeno comienza a desarrollarse puede ocurrir que el fluido alcance la respectiva presión de vapor ocasionando que las moléculas líquidas cambien a estado de vapor, esto forma “cavidades” que se desplazan a zonas donde hay mayor presión e implosionan, esto quiere decir que las burbujas o cavidades al ser oprimidas o “aplastadas” por la zona de mayor presión de forma brusca desencadena una estela de gas que es capaz de romper la superficie que la contiene en este caso la bomba.

Ilustración 56 Daño por cavitación.⁵³



Fuente Tomada en línea de <http://ingesaerospace-mechanicalengineering.blogspot.com>

⁵³ <http://ingesaerospace-mechanicalengineering.blogspot.com>

4.2.7. Presión de vapor⁴⁸. La presión de vapor p_{vp} es la que determina las condiciones para la formación de burbujas. Si el fluido se encuentra en equilibrio en la forma donde existe vapor y líquido habrá un balance de vapor en el líquido provocado a su vez por las fuerzas de atracción entre moléculas. Bajo estas condiciones la presión del líquido se le denomina presión de vapor. El valor de la carga de vapor se puede obtener al dividir la presión de vapor entre el peso específico a la misma temperatura. La carga de presión de vapor se ve afectada incrementándose a medida que la temperatura aumenta.

Tabla 20 Características del agua, presión de vapor (presión kPa, carga m). Peso específico.²⁰

TEMPERATURE		VAPOR PRESSURE				SPECIFIC GRAVITY
°F	°C	P.S.I. ABSOLUTE	KPa ABSOLUTE	FEET	METERS	
40	4.4	.1217	.8391	0.281	.0856	1.0000
50	10	.1781	1.2280	0.4115	.1254	.9997
60	15.6	.2563	1.7671	0.592	.1804	.9990
70	21.1	.3631	2.5035	0.815	.2482	.9980
80	26.7	.5069	3.4950	1.17	.3566	.9966
90	32.2	.6982	4.8140	1.612	.4913	.9950
100	37.8	.9492	6.5445	2.191	.6678	.9931
110	43.3	1.275	8.7909	2.942	.8967	.9910
120	48.9	1.692	11.6660	3.91	1.1918	.9888
130	54.4	2.223	15.3271	5.145	1.5682	.9857
140	60	2.889	19.9191	6.675	2.0345	.9833
150	65.6	3.718	25.6349	8.56	2.6091	.9803
160	71.1	4.741	32.6882	10.945	3.3360	.9773
170	76.7	5.992	41.3136	13.84	4.2184	.9738
180	82.2	7.510	51.7800	17.35	5.2883	.9702
190	87.8	9.339	64.3905	21.55	6.5684	.9660
200	93.3	11.5	79.4970	26.65	8.1229	.9632
210	98.9	14.12	97.3546	32.6	9.9365	.9592

Fuente: <http://www.bombasbraun.cl/wp%20autocebantes/Tecnicos%20Autocebantes.htm>

4.2.8. NPSH. (Net positive suction head) carga de succión positive neta, es un parámetro que los fabricantes de bombas tienen en cuenta y que adjuntan en sus bombas ya que con este parámetro muestran la carga de succión requerida $NPSH_R$. El reporte del $NPSH_R$ muestra resultados de la bomba en cada condición de operación de la bomba como el flujo volumétrico y la carga total sobre la bomba.

Para la aplicación en un sistema el $NPSH_R$ sirve para tenerlo de referencia y diseñar de forma que la carga de succión positiva disponible $NPSH_A$ esté por encima del $NPSH_R$. Según la ANSI (American National Standards Institute) y el HI (Hydraulic Institute) el margen mínimo para el $NPSH_A$ debe ser de 10% sobre le $NPSH_R$.

Ecuación 55 Margen entre la carga de succión neta requerida y disponible.

$$M = NPSH_A - NPSH_R$$

Aplicando la sugerencia de la ANSI entonces;

$$NPSH_A > 1.10NPSH_R$$

La magnitud del $NPSH_A$ depende de varias características del sistema como;

- Presión del vapor del fluido bombeado.
- Pérdidas de energía en la línea de succión.
- Ubicación del almacenamiento del fluido.
- Presión aplicada al almacenamiento.

Por lo tanto se puede expresar así;

Ecuación 56 Carga de succión neta disponible.

$$NPSH_A = h_{sp} \pm h_s - h_f - h_{vp}$$

p_{sp} = Presión Estática sobre el fluido ubicado en el depósito.

h_{sp} = Carga de presión estática sobre el fluido ubicado en el depósito.

h_s = Diferencia de elevación. Esta medida se toma desde la superficie del fluido hasta la parte o nivel central de la entrada de la bomba, si la bomba se encuentra ubicada por debajo del depósito, se toma una medida positiva.

h_s positiva

Si la bomba se encuentra por encima del depósito se toma una medida negativa.

h_s negativa

h_f = Pérdida de carga en la línea de succión, debido a la fricción y accesorios.

P_{vp} = Presión de vapor absoluta del fluido a la temperatura de bombeo.

$$h_{vp} = \frac{P_{vp}}{\gamma}$$

h_{vp} = Carga de presión de vapor a la temperatura de bombeo.

4.2.9. Línea De Succión. La línea de succión es una de las partes críticas de un sistema hidráulico, y esta se refiere a la sección que va desde el depósito a la entrada de la bomba. Esta línea es de suma importancia en la etapa de diseño ya que con esta se debe garantizar una carga de succión neta positiva adecuada.

Si en un sistema el hecho de ubicar la bomba por debajo de la sección del depósito hace que haya una NPSH satisfactoria, además que una columna de agua siempre estará disponible para el arranque de la bomba.

La línea de succión debe garantizar que el fluido debe mantener limpio y libre de partículas que puedan causar daño a la bomba. En el sistema es importante garantizar el buen desempeño de la bomba y es usual utilizar una válvula y ubicarla antes de la entrada de la bomba.

Se busca que sea una válvula que no genere gran fricción o pérdidas de energía ya que esto podría generar bolsas de aire que son peligrosas para la bomba. También se aconseja que para la línea de succión la tubería utilizada no sea de menor tamaño que el diámetro de la entrada de la bomba, incluso puede ser una ventaja si la tubería es un poco mayor así contrarresta las pérdidas de energía causadas por la fricción.

Ilustración 57 Tipos de reductores a) excéntrico. b) concéntrico.



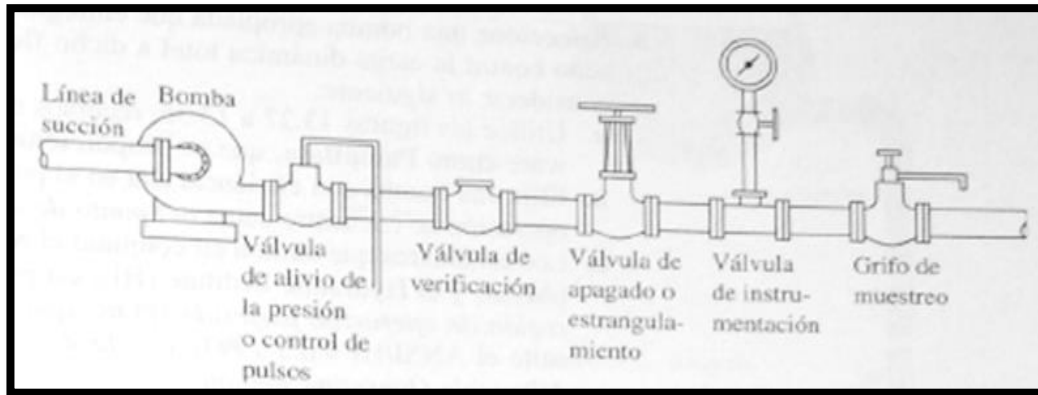
Fuente Tomada en línea de <http://nbi.en.alibaba.com>

4.2.10. Línea De Descarga. Según textos de mecánica de fluidos como el de Robert Mott, aconsejan que la tubería de descarga sea lo más corta y directa posible ya que esto reduce la carga sobre la bomba.

En esta línea de descarga se ubica una válvula justo después de la bomba esto con el fin de poder manipular la bomba para mantenimiento, reemplazo y seguridad del sistema. Cabe anotar que la bomba debe operar solo si esta válvula se encuentra abierta dado que pueden causar un gran daño a la bomba y tubería si ésta se encontrara cerrada.

Sin embargo cabe la posibilidad de ubicar una válvula de alivio esto para evitar que existan daños a la unidad en caso de que por alguna razón se encuentre bloqueado el paso del fluido.

Ilustración 58 Posibles válvulas en la Línea de descarga.⁵⁴



Fuente Tomada del libro de mecánica de fluidos de Robert Mott 6ta edición.

⁵⁴ MOTT, Robert L. , Mecánica de fluidos. México: Pearson Educación, 2006. P 411. C13

5. DISEÑO PRELIMINAR DE UN TÚNEL HIDRODINÁMICO PARA VISUALIZACIÓN DE CUERPOS FUSELADOS.

5.1. ANÁLISIS DE DISEÑO SECCIÓN DE VISUALIZACIÓN

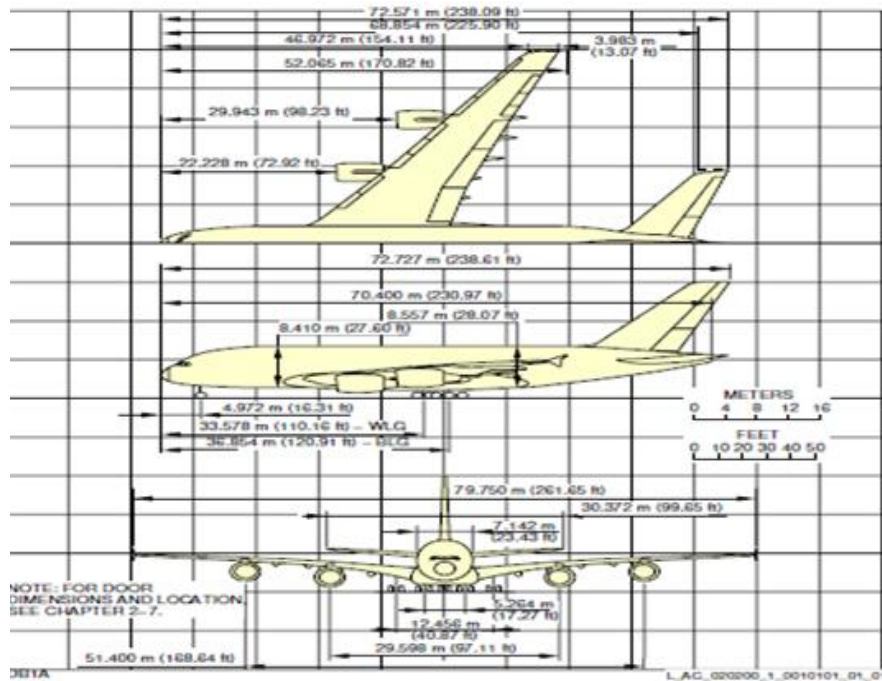
En esta etapa la investigación se basa en la historia de otros túneles hidrodinámicos y así tener un punto de comienzo y comparación para elegir las dimensiones apropiadas y el material apropiado teniendo en cuenta varios parámetros como:

- La visualización del objeto en prueba debe ser cómoda, nítida, y sin obstáculos.
- El flujo del agua debe ser laminar, por lo tanto el material de esta sección debe ser lo más liso posible para evitar turbulencias ajenas a las pruebas.
- El material que se encuentra en la ventana de visualización debe ser lo más transparente posible.
- Material durable y que no presente variaciones en sus características físicas al interactuar con el medio (agua).
- Las dimensiones deben ser apropiadas para una medida máxima de 30 centímetros de la probeta o modelo con el fin de estudios didácticos y de análisis.
- Fácil manejo en la variación de características del medio y del modelo de prueba (velocidad y ángulos).

5.1.1. Elección de dimensiones. Según los parámetros a tener en cuenta el túnel debe ser de fácil manejo por estudiantes e investigadores como también el modelo no puede exceder los 30 centímetros de ancho.

Por lo tanto si hablamos en el caso de una aeronave como modelo a escala, si su envergadura máxima es de 25 centímetros, el fuselaje de este puede oscilar entre un 80% a 150% de la envergadura aproximadamente.

Ilustración 59 Dimensiones A380.



Fuente: 4 Aircraft Characteristics Airbus A380 Airport and maintenance planning.

En el RHRC (Rolling Hills Research Center) producen un túnel el cual denominan como modelo 0710 -Ilustración 60- este modelo está diseñado para demostraciones escolares y universitarias con objetivos similares a nuestro túnel en desarrollo, por lo tanto tomamos las medidas que ellos usan y analizamos los pros y contras de la dimensión de la sección de prueba.

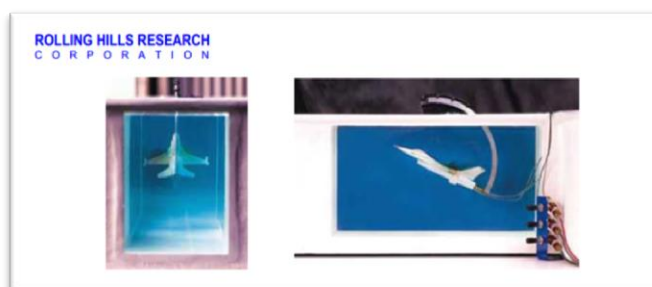
Ilustración 60 RHRC modelo 0710.



Fuente Tomada en línea de http://www.rollinghillsresearch.com/Water_Tunnels/Model_0710.html

La Ilustración 60 RHRC modelo 0710 en su sección de visualización tiene las siguientes dimensiones 18 x 25 x 45 centímetros aproximadamente. Según la ilustración y analizando de manera objetiva la sección de visualización se puede ver que las dimensiones son pequeñas y a su vez limitadas, claramente el modelo que usan para pruebas está al límite de visualización por lo tanto es un aspecto a mejorar en nuestro diseño.

Ilustración 61 Sección de visualización del modelo 0710 RHRC.

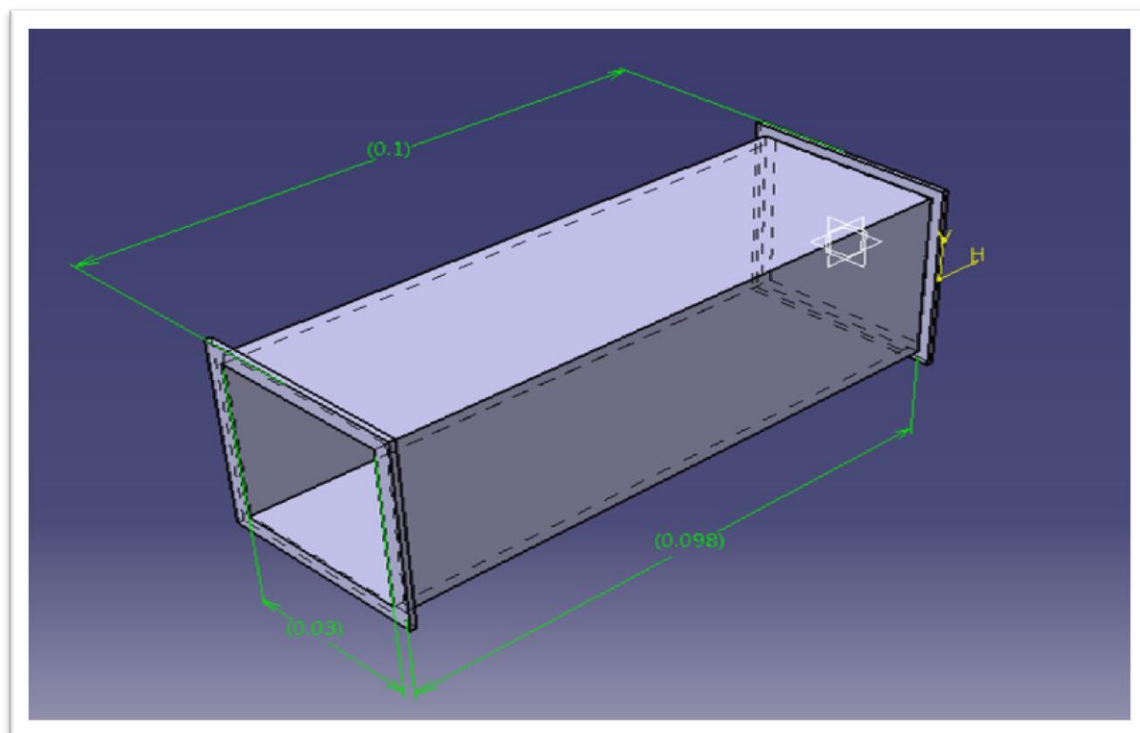


Fuente Tomada en línea de http://www.rollinghillsresearch.com/Water_Tunnels/Model_0710.html

En la sección de visualización una de las aeronaves de guerra más grandes (f-16) donde su longitud es el 149% de su envergadura, por lo tanto si el modelo fuese una escala de 25centímetros de envergadura su longitud sería 37.25centímetros aproximadamente. De tal manera podemos comenzar a tener una idea de dimensiones aproximadas. Se debe tener en cuenta que la sección debe contar con un espacio para asegurar que el modelo se encuentre dentro de un flujo laminar como también un lugar para poder descansar el modelo y realizar los diferentes cambios de características como un brazo rotador para cambiar el ángulo del modelo un elevador para subir o bajar el mismo, como también un eje longitudinal para rotaciones sobre este entre otras.

Con lo anterior debemos contar con un espacio mínimo de 100 centímetros de longitud para garantizar el espacio adecuado para la implementación de dispositivos de manipulación y tintas de prueba, un ancho y alto de 30 centímetros teniendo ya unas dimensiones preliminares las cuales pueden ser cambiadas si se encuentra que puede afectar el flujo laminar o que genere algún tipo de inconveniente en el desarrollo de pruebas. Cabe anotar que una longitud de 100 centímetros permite además una visualización colateral a otros fenómenos como el de laminación de flujo y pruebas con artefactos más largos lo que amplía de gran forma las aplicaciones del túnel.

Ilustración 62 Dimensiones preliminares.



Fuente Realizada por el autor.

La Ilustración 62 se aprecia las dimensiones preliminares de la sección de visualización.

Selección de material. Según el RHRC (Rolling Hills Research Center)-Centro de Investigación Rolling Hills-en sus túneles utilizan vidrio templado para las secciones de visualización así que podemos tener en cuenta este tipo de material aunque existen también otros materiales transparentes que podríamos comparar y hallar el que mejor garantice calidad, visualización clara, durabilidad, resistencia, baja rugosidad y que sea de fácil mantenimiento. Una característica principal a la hora de escoger un material apropiado es que su índice de refracción no sea muy alto es decir que no distorsione la visualización. En el caso del vidrio el índice de refracción es de 1.58 y el del acrílico o Polimetilmetacrilato (PMMA)⁵⁵ es 1.491-Tabla 21 donde puede decirse que es mejor la visualización en el acrílico que en el vidrio. “El PMMA o Acrílico es el mejor de los plásticos en cuanto a su resistencia a la intemperie, transparencia y resistencia al rayado. Fue descubierto en Alemania y su utilización médica se remonta a 1936. Desde entonces ha sido empleado como cemento óseo, prótesis óseas, dentaduras, ojos artificiales, lentes de

⁵⁵ <http://www.pslc.ws/spanish/pmma.htm>

contacto, aditivos en polvo, etc. El Polimetilmetacrilato (PMMA) fue uno de los primeros polímeros utilizados como material biomédico, aplicándose como material para reparar la córnea humana⁵⁶.

Tabla 21 Índices de refracción.

Tabla de índices de refracción (para $\lambda = 589 \text{ nm}$)

www.vaxasoftware.com

Sólidos			
Nombre	Fórmula	Temperatura °C (λ)	n
Ágata	SiO_2	25	1,53-1,54
Aguamarina	$\text{Be}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_3)_6::\text{Fe}$	25	1,56-1,60
Amatista	$\text{SiO}_2::\text{Fe}^{3+}$	25	1,54
Ambar		25	1,55
Arseniuro de galio	GaAs	25	3,927
Berilo	$\text{Be}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_3)_6$	25	1,56-1,60
Cloruro de plata	AgCl	25	2,0668
Cloruro de sodio	NaCl	25	1,544
Córnea humana		37	1,3375
Criolita	Na_3AlF_6	25	1,338
Cristalino humano		37	1,386-1,406
Cuarzo	SiO_2	25	1,544
Diamante	C	25	2,417
Dióxido de titanio (Rutilo)	TiO_2	25	2,496
Esmeralda	$\text{Be}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_3)_6::\text{Cr}$	25	1,576-1,582
Fluoruro de calcio (Fluorita)	CaF_2	25	1,43
Fosfato de aluminio	AlPO_4	25	1,53
Fosforo de galio	GaP	25	3,5
Germanio	Ge	25	4,01
Hielo	H_2O	25	1,309
Lapislázuli		25	1,5
Malaquita	$\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$	25	1,655-1,909
Polimetil metacrilato (PMMA)	$(\text{C}_5\text{O}_2\text{H}_8)_n$	25	1,491
Nylon	$\dots\text{-NH-C(=O)-(CH}_2)_m\text{-C(=O)-NH-(CH}_2)_n\text{-}\dots$	25	1,53
Obsidiana		25	1,50
Ópalo	$\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	25	1,45
Óxido de aluminio	Al_2O_3	25	1,76
Óxido de cinc	ZnO	25 (390 nm)	2,4
PET	$(\text{C}_{10}\text{H}_8\text{O}_4)_n$	25	1,575
Policarbonato	$(\text{OC}(\text{OC}_6\text{H}_4)_2\text{CMe}_2)_n$	25	1,585
Poliestireno	$(\text{C}_8\text{H}_8)_n$	25	1,55-1,59
Rubí	Al_2O_3	25	1,77
Silicio	Si	25	4,01
Teflón	$(\text{C}_2\text{F}_4)_n$	25	1,36
Topacio	$\text{Al}_2\text{SiO}_5(\text{F},\text{OH})_2$	25	1,606
Turmalina		25	1,610-1,675
Turquesa	$\text{CuAl}_6(\text{PO}_4)_4(\text{OH})_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	25	1,61
Vidrio Crown		25	1,52
Vidrio Flint denso		25	1,66
Vidrio Flint ligero		25	1,58
Vidrio Flint medio		25	1,62
Vidrio Pirex® (borosilicato)		25	1,470
Yodo	I_2	25	3,34
Zafiro	Al_2O_3	25	1,762-1,778
Zircón	ZrSiO_4	25	1,923
Zirconia cúbica	ZrO_2	25	2,15-2,18

Fuente Tomada en línea de <http://www.vaxasoftware.com>

⁵⁶ Robinson et al., 2001.

Ilustración 63 Láminas de Acrílico⁵⁷.



Con la comparación en ventajas y desventajas entre el vidrio y el acrílico podemos ver que el acrílico tiene mayores ventajas que el vidrio. Al mirar varias páginas en la web de empresas que manejan ambos productos, se encontró que las características del PMMA o acrílico son mejores, incluso el índice de refracción al ser menor garantiza una visión más nítida de las pruebas a realizar en el túnel.

Tabla de comparación de características entre el vidrio y el acrílico.

Tabla 22 comparación de características entre el vidrio y el acrílico.

Acrílico	Vidrio
Peso específico 2100 Kg/m ³ <i>Más liviano</i>	Peso específico 2600 Kg/m ³
Resistente a impactos	Frágil
Propenso a rasguños	Resistente a rasguños
Mínima degradación óptica	Mínima degradación óptica
Índice de refracción 1.49 <i>(menor distorsión)</i>	Índice de refracción 1.58
Mayor costo	Más económico
Mayor transparencia que el vidrio	Buena transparencia <i>(Se reduce al tener un mayor calibre).</i>

Fuente: Realizada por el autor.

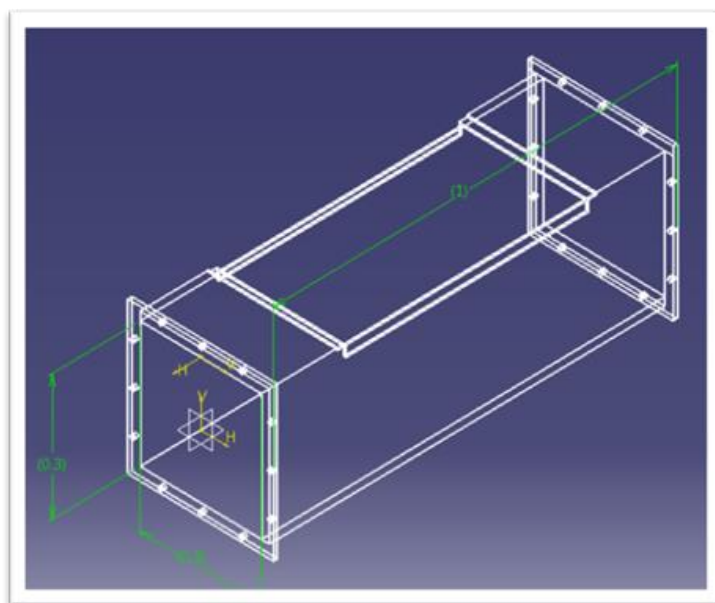
⁵⁷ imagen tomada de <http://www.szcmec.cn/>

Las propiedades ópticas y mecánicas que pueden ser degradadas por causa de los rayos UV si se está expuesto son mínimas al usar PMMA dado que este material solo absorbe ciertos montos de luz y radiación UV gracias a su transparencia⁵⁸. Esta pequeña cantidad de radiación absorbida no tiene la energía para romper los enlaces moleculares necesarios dentro de este material. Esta es una propiedad única de los polímeros lo que la hace perfecta para aplicaciones expuestas a cambios del medio ambiente como nuestro proyecto.

5.1.2. Conclusión de dimensiones y materiales. Podemos concluir que la sección de visualización bajo los requerimientos y los aspectos anteriormente expuestos con distintos materiales y dimensiones la mejor opción para la aplicación y garantía de una buena visualización es la utilización de PMMA y las dimensiones de 1m de longitud, 0.3m de ancho, y 0.3m de alto. Cabe anotar que para ciertas pruebas el modelo debe tener una distancia prudente con las paredes de la sección, por lo tanto para algunos modelos la medida máxima a lo ancho deberá ser menor al menos un 10% de la medida del ancho del túnel.

La Ilustración 64 muestra el estado final del túnel cabe anotar que algunos parámetros podrían cambiarse sí en el desarrollo del estudio se encuentra que es necesario realizarlos.

Ilustración 64 Dimensiones y material final del túnel en desarrollo.



Fuente Realizada por el Autor.

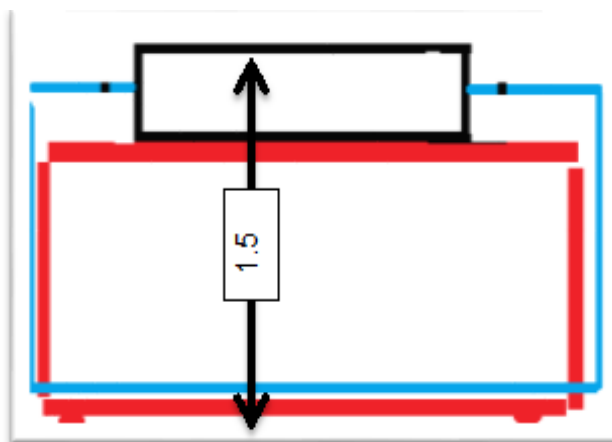
⁵⁸Tomada en línea [<http://www.slideshare.net/luigiriv/polimetilmetacrilato-pmma>]

Con la sección de visualización lista para análisis se plantea la ubicación de las diferentes secciones del túnel, algunas secciones que se deben de tener en cuenta son:

- Filtro de limpieza de agua.
- Posibles Válvulas
- Difusores
- Tubería
- Ubicación de la bomba
- Laminación.

Podemos comenzar dando una altura adecuada de visualización si la altura promedio en personas Colombianas se encuentra entre los 1.50 y 1.70 metros según una publicación del El Tiempo (MAM-5268665). Podemos predecir que el túnel esté entre 1.35 a 1.5 metros desde el piso para poder manipular y tener una buena visión de la sección de prueba. Por lo tanto la altura máxima más cómoda para el túnel es de 1.50 metros. La Ilustración 65 muestra líneas azules que representan la tubería que recirculará el agua, las líneas rojas representan el mueble en el cual puede reposar el túnel.

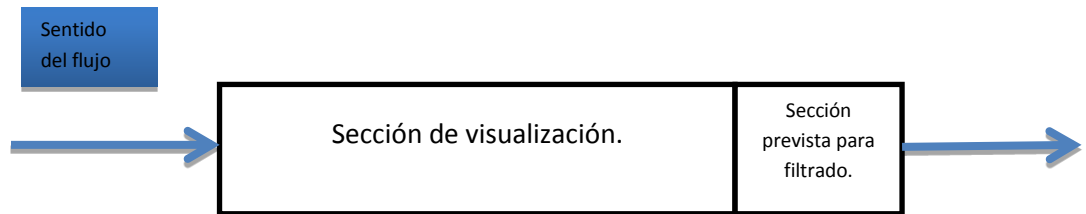
Ilustración 65 Medida de altura del túnel en metros.



Fuente: Autor

Como el túnel operará con agua como medio de interacción y esta será recirculada, debe tener un lugar para filtrar y limpiar. Esta sección de filtrado también evitará que elementos extraños ingresen al sistema de recirculación donde pueden causarse daños en la bomba, tubería, etc.

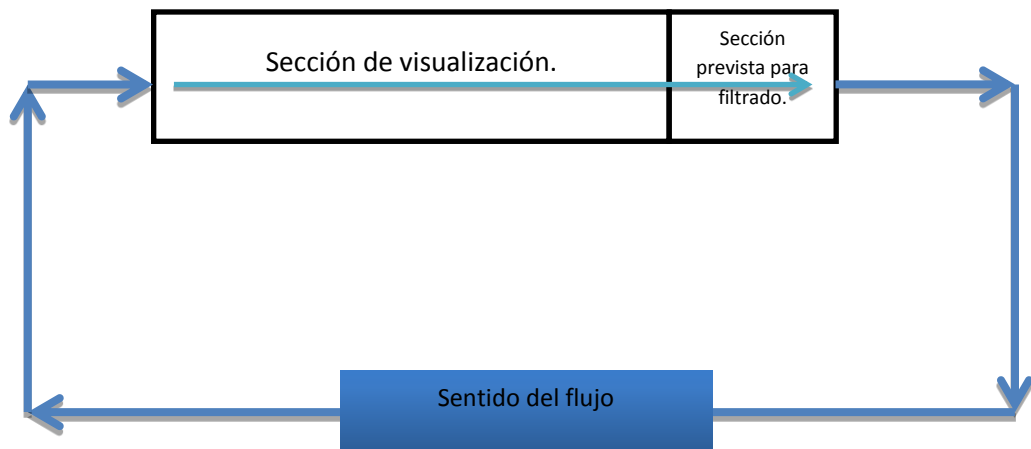
Ilustración 66 Sistemas de recirculación.



Fuente Realizada por el Autor.

Para la ubicación de la tubería debemos tener en cuenta el sentido del flujo y la altura que ya se determinó anteriormente. La Ilustración 67 muestra una alternativa de recirculación.

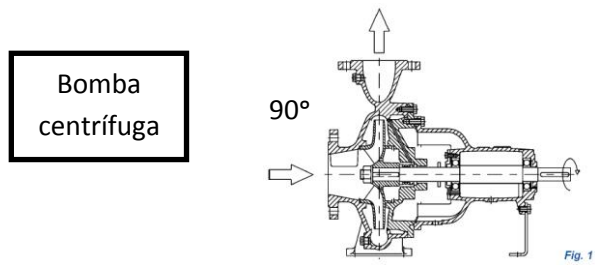
Ilustración 67 Sentido de circulación del flujo.



Fuente Realizada por el Autor.

La ubicación de la bomba es de forma preliminar pero tendremos en cuenta que se aconseja que el recorrido de la línea de descarga, “*este nombre se da a la sección que se ubica a la salida de la bomba, más adelante se hablará más sobre esta sección de la tubería*”, sea lo más corto posible. Obviamente también depende de las características de la bomba, además de que la distancia no influya con las pérdidas de energía de la línea de succión. Como esta selección de posición de la bomba es de manera preliminar y no se ha realizado ningún tipo de cálculo hasta ahora podemos verificar la disposición usual de las bombas centrífugas. En la Ilustración 68 se aprecia una disposición clásica de las bombas centrífugas donde se forma un ángulo de 90° entre la entrada y la salida del flujo.

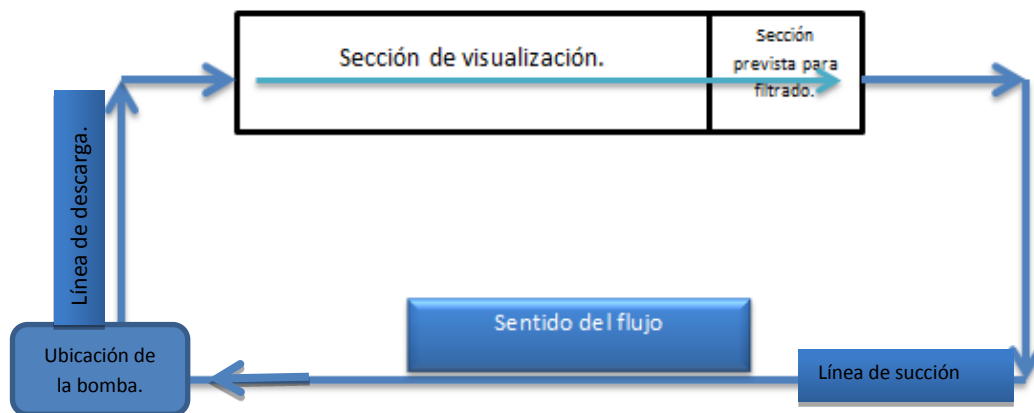
Ilustración 68 Bomba centrífuga.



Fuente http://www.lehide.com/bombas/centrifugas/bobascentr_dt.asp

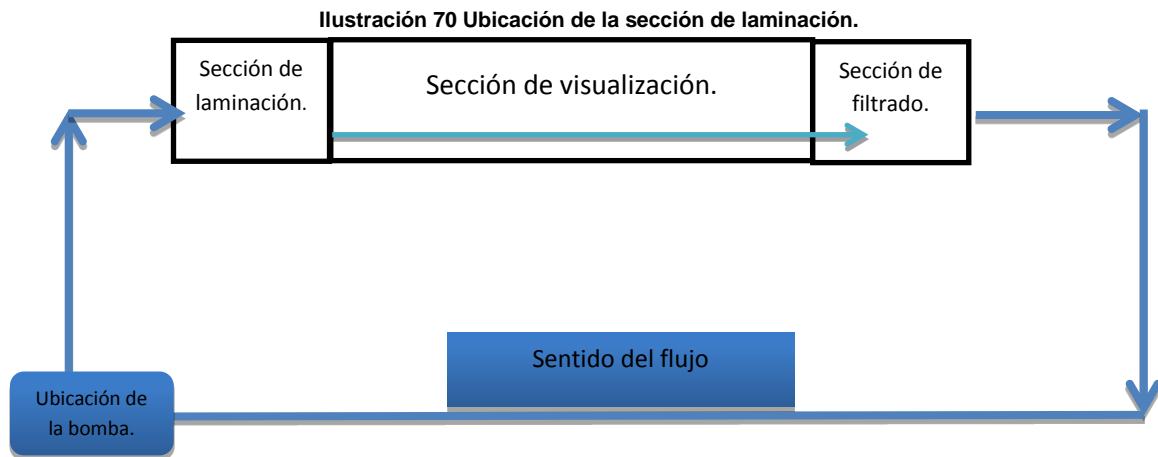
Con esa disposición usual y para evitar problemas tradicionales con la bomba la mejor opción de ubicación de la bomba será en la parte donde la línea de descarga sea más corta y directa hacia el túnel.

Ilustración 69 Ubicación de la bomba.



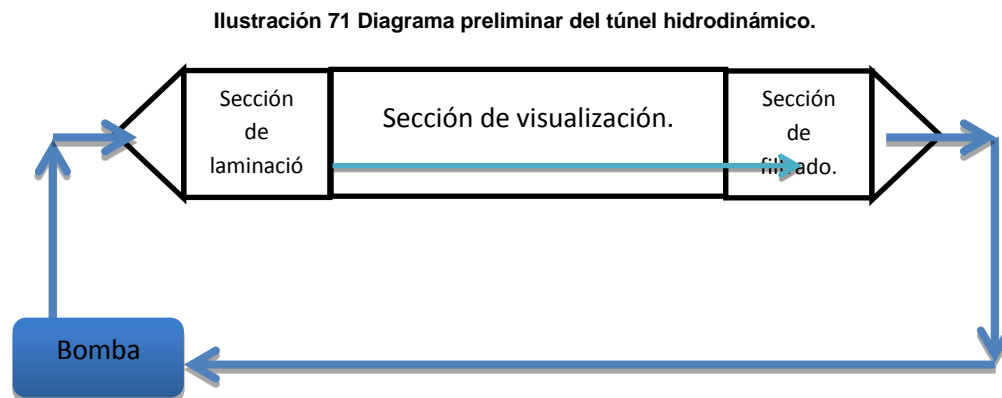
Fuente Realizada por el Autor.

La sección de laminación debe ser ubicada en un lugar anterior a la sección de prueba para garantizar que en ésta sección haya flujo laminar dado que una bomba proporcionando un alto caudal puede originar turbulencias dando resultados falsos o inexactos.



Fuente Realizada por el Autor.

Un aspecto básico en cuanto a túneles de viento o agua se refiere es una sección de control de flujo, o más bien la implementación de difusores⁵⁹ para que el cambio de área de un flujo no presente mayores problemas dado a que sí existe un cambio repentino de área esto puede ocasionar una serie de inconvenientes como pérdidas de energía y turbulencias indeseadas. Por lo tanto a cada extremo del túnel se implementan dichas secciones para así tener un cambio controlado de áreas con una contracción y expansión gradual. Este más exactamente se utilizará para unir la sección de filtrado y sección de laminación con la tubería.



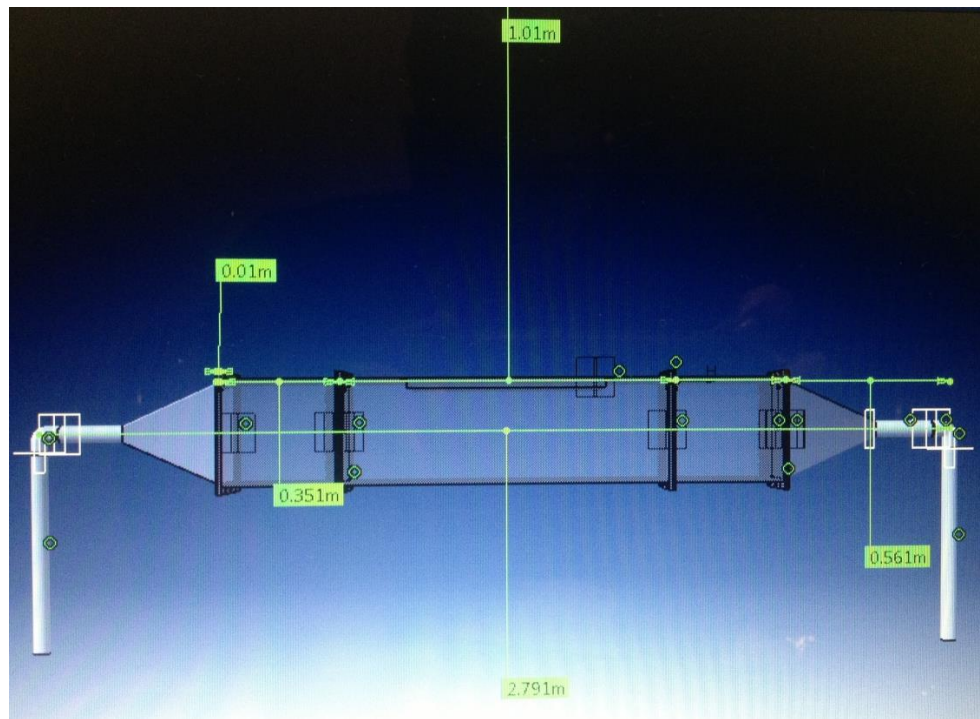
Fuente Realizada por el Autor.

Obteniendo una idea general del túnel podemos realizar un diseño en el programa Catia de Dassault Systems y tener una mejor perspectiva sobre sus dimensiones. La longitud de las secciones de laminación y filtrado tendrán un valor de 30

⁵⁹ Difusor: dispositivo que contiene en sus extremos áreas diferentes, y convergen una hacia la otra.

centímetros dado que para la variación de caudal la sección de laminación necesitará del espacio suficiente para modificar la longitud del dispositivo encargado de corregir el flujo del agua. Como también se necesita ubicar un filtro para el cuidado del túnel cabe la posibilidad de utilizar varios filtros los cuales necesitan un espacio considerable dentro del túnel.

Ilustración 72 Imagen preliminar Túnel hidrodinámico.



Fuente Realizada por el autor.

5.2. CÁLCULOS DE FLUJO Y PARÁMETROS DE DISEÑO

5.2.1. Sección De Visualización. Características de la sección de visualización:

Longitud: $= L = 1m$

Alto: $= h = 0.3m$

Ancho: $= w = 0.3m$

Área transversal: $0.09m^2$

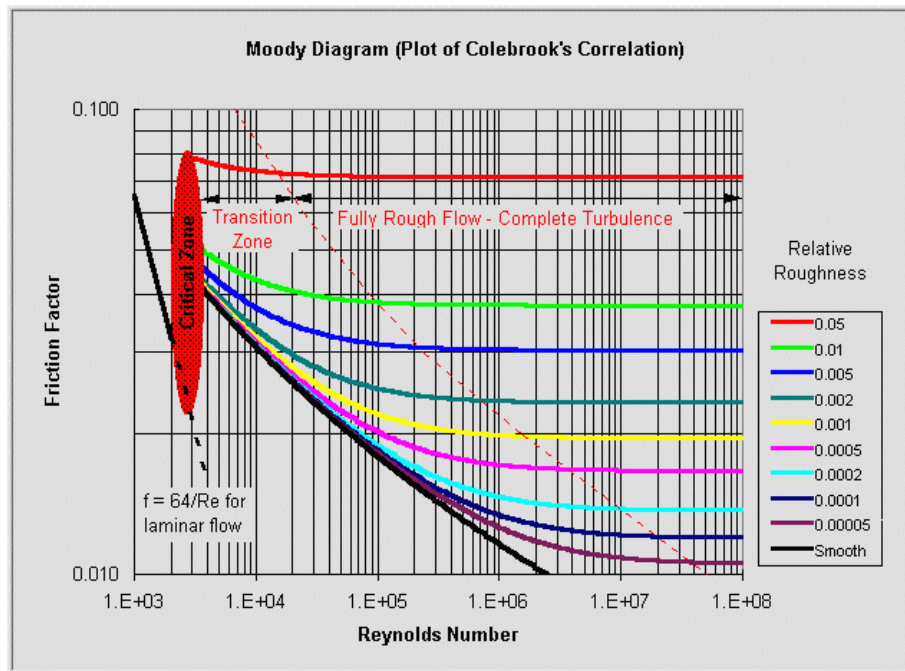
Rugosidad: $0.0014mm$

$V_{cuboide} = L \cdot h \cdot w$

Ecuación 57 $V_{cuboide} = 1 * 0.3 * 0.3 = 0.09m^3$

Como se vio anteriormente en la sección de Número Reynolds y Diagrama de Moody el flujo laminar se puede garantizar cuando el número Reynolds sea menor a 2000. Por tal motivo partimos desde este parámetro para hallar la velocidad y caudal adecuados en la sección de visualización.

Tabla 23 Diagrama de Moody.



Fuente: Tomada en línea de http://www.picstopin.com/637/moody-diagram/http:%7C%7Cweb*deu*edu*tr%7Catiksu%7Ctoprak%7Cmuabak*gif/

Según nuestros parámetros para el diagrama de Moody la rugosidad relativa de nuestro sistema sobrepasan los 100000 analizando tenemos:

$$Rugosidad\ relativa = \frac{D}{\epsilon}$$

Como el material elegido es el acrílico tenemos que el valor de rugosidad es;

$$\epsilon = 0.0014mm$$

$$\frac{D}{\epsilon} = \frac{300mm}{0.0014mm} = 214,285.7$$

Con el anterior valor ubicamos la línea más cercana a este y encontramos que la línea de los 200,000 se une a la línea de tuberías lisas y nuevas por lo tanto se corrobora que el flujo laminar debe estar por debajo del número Reynolds= 2000.

Sabiendo que el número Reynolds para tuberías cuadradas es;

$$N_R = \frac{v(4R)\rho}{\eta}$$

$$R = \text{radio hidráulico} = \frac{A}{PM}$$

$$PM = \text{perímetro mojado} = 4S$$

$$S = \text{longitud de las aristas del tubo} = 0.3m$$

Ecuación 58 Perímetro mojado de la sección de visualización.

$$PM = 4(0.3) = 1.2m$$

Ecuación 59 Radio Hidráulico.

$$R = \frac{0.09m^2}{1.2} = 0.075$$

$$D = 4R = 4(0.075) = 0.3m$$

Despejamos la velocidad;

$$v = \frac{N_R \eta}{(4R)\rho}$$

Hallando la velocidad requerida,

Ecuación 60 velocidad de flujo máximo.

$$v = \frac{2000 (0.001308 \text{ Kg/(ms)})}{0.3m * 1000(\text{Kg/m}^3)} = 8.72 \times 10^{-3} m/s$$

El flujo volumétrico es;

$$Q = Av = 0.09m^2 * 8.72 \times \frac{10^{-3}m}{s} = 7.848 \times 10^{-4} m^3/s$$

En conclusión la sección de visualización debe contar con un caudal de $7.848 \times 10^{-4} m^3/s$ y una velocidad promedio de $8.72 \times 10^{-3} m/s$. Ahora podemos ver el comportamiento de la capa de frontera o capa límite que se encontrará en la sección de visualización.

Para poder entrar en el tema de capa límite debemos hallar el perfil de velocidades en este caso para nuestro túnel tenemos:

Ilustración 73 Perfil de velocidades.



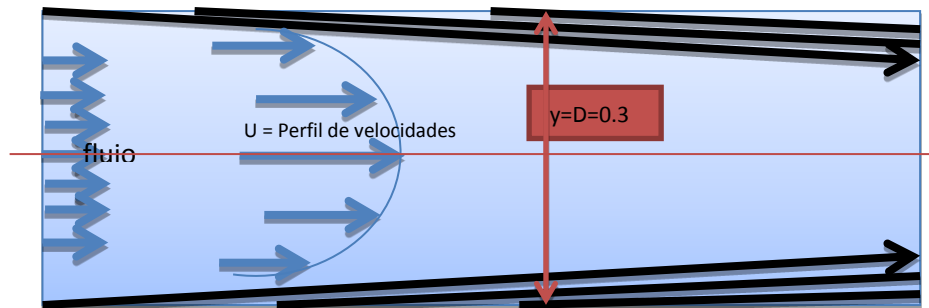
Fuente Realizada por el Autor.

Para hallar la velocidad de un punto específico aplicamos la siguiente formula;

$$U = 2v \left(1 - \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \right)$$

Donde v es la velocidad promedio $v = 0.00872 m/s$, r_0 es el radio máximo de la sección de visualización y este valor depende del perímetro mojado hallado anteriormente donde $D = 0.3m$ por lo tanto $r_0 = 0.15m = 150mm$ y $r =$ radio variable $r(dy)$.

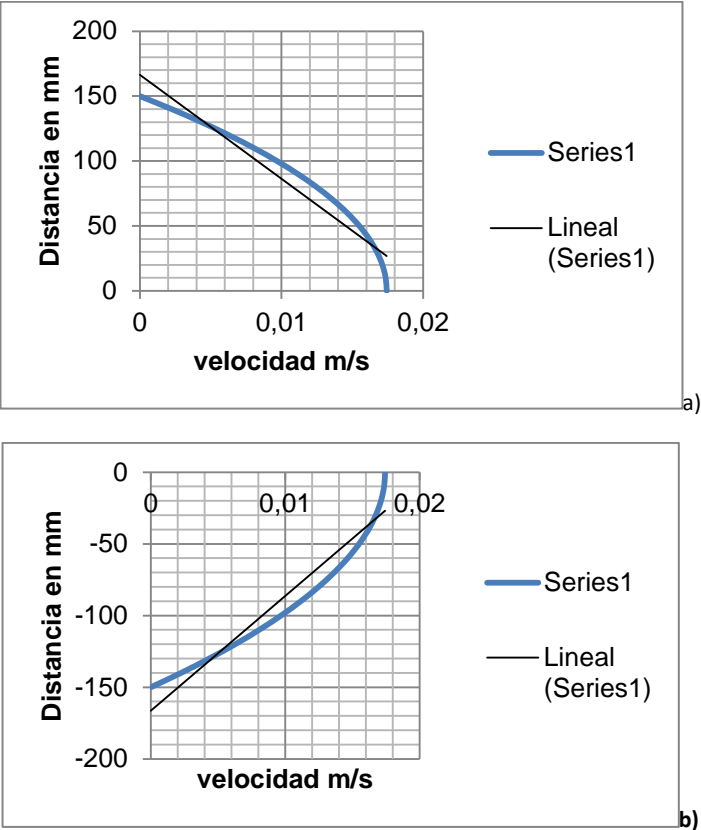
Ilustración 74



Fuente: Realizada por el Autor.

Para poder hallar la velocidad en cada punto se realizó una hoja de cálculo y poder ver en la gráfica el resultado del perfil de velocidades.

Ilustración 75 Perfil de velocidades en la sección de visualización. a) Parte superior b) Parte inferior.



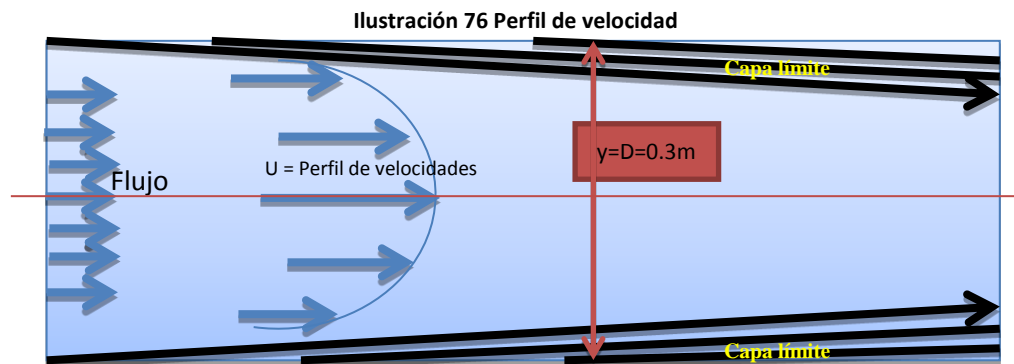
Fuente: Realizada por el Autor.

Tabla 24 Hoja de cálculo para perfil de velocidades en la sección de visualización.

PERFIL DE VELOCIDAD SECCIÓN DE VISUALIZACIÓN			
V (VELOCIDAD PROMEDIO)		0.00872	m/s
r0 radio max		150	mm
U =(VELOCIDAD LOCAL)		r (local)	
0.01744	m/s	0	mm
0.01736249	m/s	10	mm
0.01712996	m/s	20	mm
0.0167424	m/s	30	mm
0.01619982	m/s	40	mm
0.01550222	m/s	50	mm
0.0146496	m/s	60	mm

0.01364196	m/s	70	mm
0.01247929	m/s	80	mm
0.0111616	m/s	90	mm
0.00968889	m/s	100	mm
0.00806116	m/s	110	mm
0.0062784	m/s	120	mm
0.00434062	m/s	130	mm
0.00224782	m/s	140	mm
Pared del túnel 0	m/s	150	mm
Pared del túnel 0	m/s	-150	mm
0.00224782	m/s	-140	mm
0.00434062	m/s	-130	mm
0.0062784	m/s	-120	mm
0.00806116	m/s	-110	mm
0.00968889	m/s	-100	mm
0.0111616	m/s	-90	mm
0.01247929	m/s	-80	mm
0.01364196	m/s	-70	mm
0.0146496	m/s	-60	mm
0.01550222	m/s	-50	mm
0.01619982	m/s	-40	mm
0.0167424	m/s	-30	mm
0.01712996	m/s	-20	mm
0.01736249	m/s	-10	mm
0.01744	m/s	0	mm

Los valores de la línea vertical están en milímetros mientras que la línea horizontal muestra las velocidades, esto con el fin de poder apreciar el perfil de velocidades.

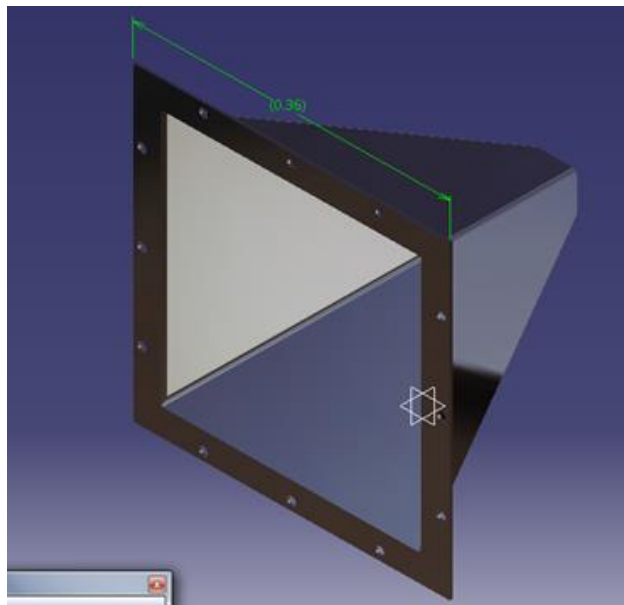


Fuente: Realizada por el Autor.

Aunque la capa límite se aprecia de forma exagerada por condiciones de ejemplo, esta capa depende de una gran longitud y un número de Reynolds dado para poder apreciarla y ver qué efecto tiene cuando un flujo pasa sobre algún objeto. Para que esta sea significativa debería ser una longitud bastante larga y realizar una serie de análisis más puntuales que en el caso de las dimensiones de nuestro túnel no aplican.

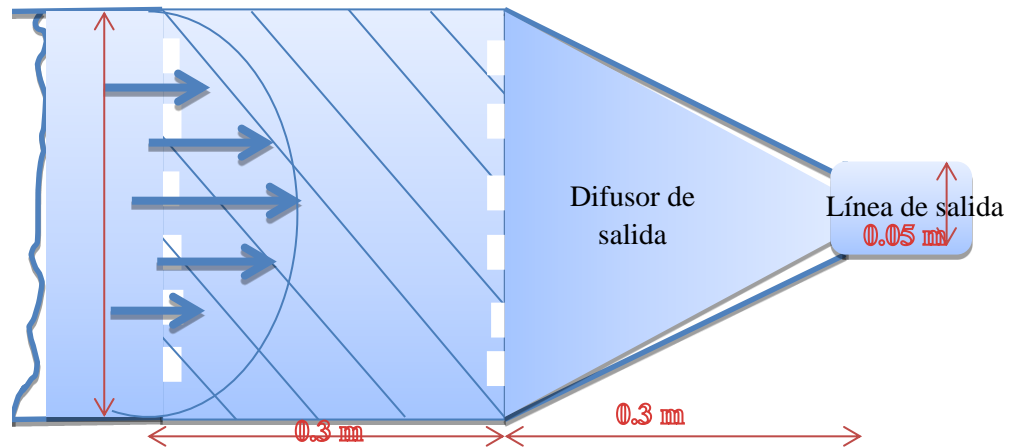
5.2.2. Análisis de diseño de la sección de filtrado y difusor de salida. Al seguir la dirección que llevará el flujo nos encontramos con la siguiente sección del túnel, la sección de filtrado y difusor de salida. La sección de filtrado está destinada para la limpieza y retención de objetos extraños que puedan afectar la operación del sistema como la de la bomba. En el caso del difusor, este se aplica para realizar el paso de un área mayor a un área transversal menor que se acoplará a la tubería del sistema o línea de salida con el fin de direccionar el flujo hacia la bomba.

Ilustración 77 Difusor de salida.



Fuente: Realizada por el Autor.

Ilustración 78 Perfil de velocidad en sección de filtrado.



Fuente: Realizada por el Autor.

5.2.3. Características de la sección de filtrado.

Longitud: $= L = 0.3m$

Alto: $= h = 0.3m$

Ancho: $= w = 0.3m$

Área transversal: $0.09m^2$ entrada, y $0.0025m^2$ salida

Rugosidad: $0.0014mm$

Volúmenes de laminación Vd_L y filtrado Vd_f son:

$$Vd_L = Vd_f = 0.3 * 0.3 * 0.3 = 0.027m^3$$

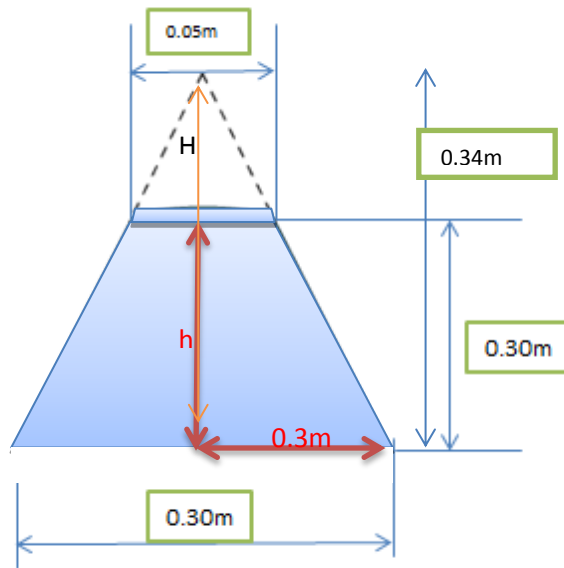
Como la geometría del difusor usado es piramidal aplicamos la siguiente ecuación para hallar el volumen de esta sección.

Ecuación 61

$$Vp = \frac{(A_b * H)}{3}$$

$$Vp = \frac{0.09m^2 * 0.34m}{3} = 0.0102m^3$$

Ilustración 79 Parte interna de las secciones de contracción y expansión gradual.



Fuente: Realizada por el Autor.

Observando la Ilustración 79 podemos apreciar que para saber el volumen del difusor V_d y así saber qué cantidad de agua contendrá debemos aplicar la Ecuación 62 para obtener volumen completo sin embargo nos dará un valor mayor dado que se está teniendo en cuenta el volumen de la sección punteada.

Por lo tanto debemos restar el volumen de esa pequeña sección para tener un valor más exacto.

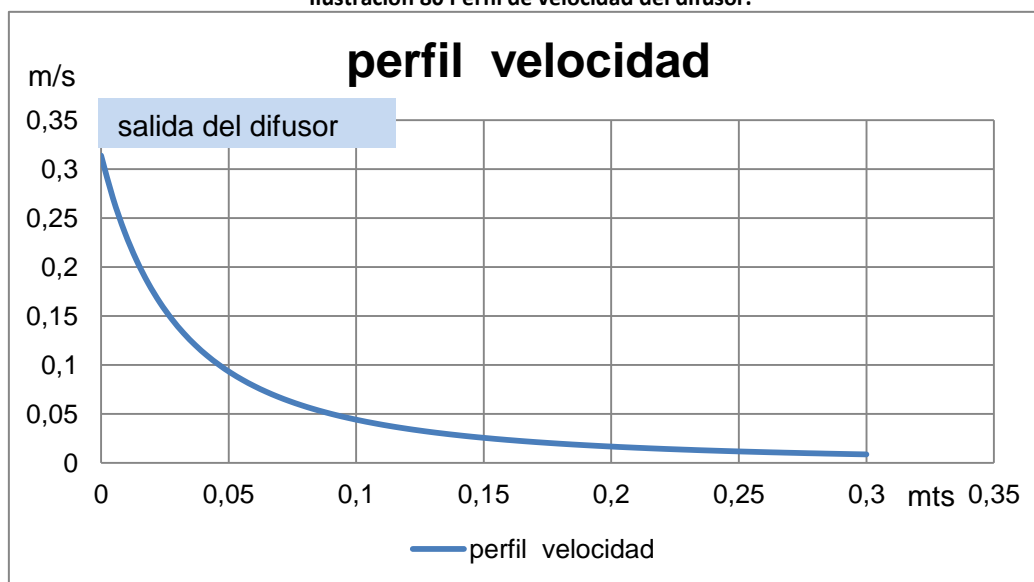
Ecuación 62

$$V_d = V_p - \left[A_h * \frac{H - h}{3} \right]$$

$$V_d = 0.012m^3 - \left[0.0025m^2 * \frac{(0.34 - 0.3)m}{3} \right]$$

$$V_d = 0.012m^3 - 3.33 \times 10^{-5}m^3 = 0.010m^3$$

Ilustración 80 Perfil de velocidad del difusor.



Fuente: Realizada por el Autor.

5.3. LÍNEA DE SUCCIÓN Y DESCARGA

Como el túnel contiene agua podemos usar tubería PVC (Policloruro de Vinilo) en la investigación documentos que proveen PAVCO S.A se encontró que este tipo de tubería es de uso común para trabajos de plomería, donde existen presiones altas y trabajo pesado, también se utiliza para conducir agua potable por sus características inertes. Esto quiere decir que su material evita que se creen organismos biológicos garantizando la conservación del agua esto según la verificación hecha de acuerdo a la ANSI/NSF 61:02, sin exceder los valores máximos de aluminio, antimonio, cobre, arsénico, bario, cadmio, cromo, plomo, mercurio, níquel, selenio y plata que establece el decreto 1575 de 2007 y la resolución 1575 de 2007. Además la resina de PVC con que se fabrica ha sido certificada de tal forma que el cloruro de vinilo monómero residual es menor a 3,2mg/kg. La fabricación de esta tubería bajo la firma PAVCO son fabricadas bajo las normas NTC382 y para este sistema utilizaremos cédula 40, entre las ventajas de este tipo de tubería se encuentra que es lisa reduciendo de forma considerable pérdidas de presión dado a la fricción, es fácil de instalar y utiliza el sistema de soldadura líquida formando un conjunto homogéneo en la tubería dando una resistencia máxima en un corto periodo de tiempo, la vida útil se estima de 50 años obviamente sin tener en cuenta algunos aspectos que se pueden presentar en la instalación o en el entorno donde se encuentre el sistema.

En el sistema que se está desarrollando es importante tener en cuenta que la tubería sea resistente a diferentes agentes que puedan causar daño al circuito de flujo como corrosión, humedad externa, compuestos orgánicos como agentes limpiadores, además de que algunas pruebas que se realizarán en el túnel son con tintas estas pueden causar algún tipo de daño al circuito de flujo, sin embargo existe una sección donde se dispondrá un filtro para retener estas tintas, pero residuos de estas pueden filtrarse por lo tanto la tubería no debe verse afectada por tal razón.

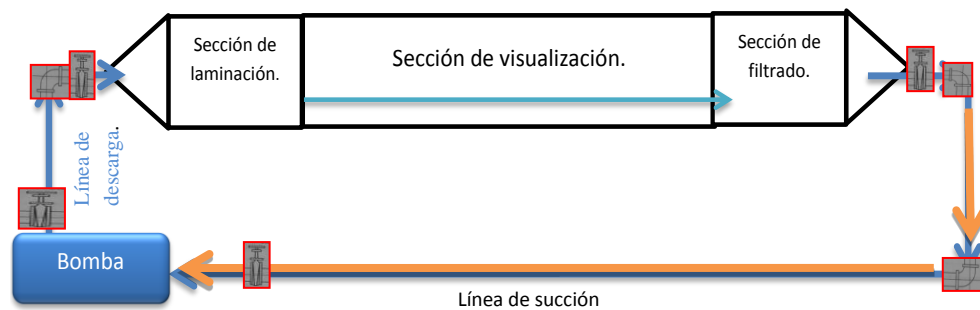
En el documento que provee PAVCO, resaltan que sus tuberías resisten al ataque químico de varios ácidos, álcalis, sales y compuestos orgánicos como alcoholes e hidrocarburos dentro de unos límites de temperatura y presión que nuestro sistema no supera dado que estos valores son muy elevados y usualmente las restricciones que se encuentran en tuberías las más estrictas son para tubería metálica que tal vez necesiten revestimientos para seguridad del sistema y de la tubería misma, además la tubería de PVC es inerte a la mayoría de los reactivos químicos, eliminando la posibilidad de contaminación del agua esto en el caso de que para el mantenimiento del túnel y del agua que será recirculada debe recibir un tratamiento para mantener la misma clara y de buen uso, los agentes usados para este procedimiento es el cloro que usualmente se utiliza en piscinas para mantenerlas limpias.

5.3.1. Detalles de la línea de succión. La línea de succión es la sección de tubería que nace desde el depósito fuente a la entrada de la bomba, según recomendaciones para diseño de tuberías como el libro de Robert Mott de mecánica de fluidos la línea de succión debe buscar una adecuada carga neta positiva para evitar la cavitación de la bomba, es por esto que la bomba del túnel estará en la parte inferior del sistema o debajo de la sección de visualización que funciona como fuente y depósito al mismo tiempo, garantizando una columna de presión suficiente para el arranque de la bomba.

Otra de las sugerencias para el diseño es que la línea de succión no puede ser de menor diámetro que el diámetro de la conexión de entrada a la bomba, incluso se puede tener un mayor diámetro y luego aplicar un reductor para realizar el acople necesario, esto para reducir velocidad y evitar pérdidas por fricción.

5.3.2. Detalles de la línea de descarga. Esta debe ser corta y directa dentro de lo posible para minimizar la carga sobre la bomba, en el caso de los codos se recomienda usar codos estándar o de radios largos. Esta debe contener una válvula cerca de la bomba para poder realizar mantenimiento o reemplazo. Se aconseja utilizar una válvula tipo globo ya que esta reduce el flujo de una forma más suave. Si se realizara un túnel de gran flujo se recomienda utilizar una válvula de verificación para evitar que el flujo regrese cuando esta no esté en funcionamiento.

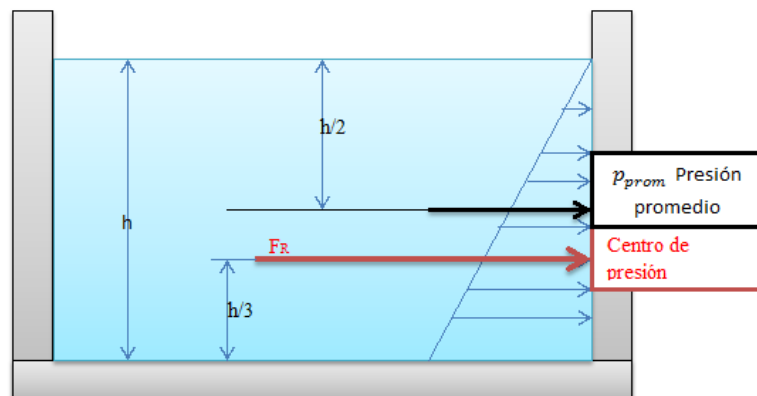
Ilustración 81 Circuito de tubería en el túnel



Fuente: Realizada por el Autor.

5.4. PRESIONES EN EL SISTEMA ESTÁTICO

Como vimos en la Ilustración 32 la distribución de presiones nos muestra la ubicación de la presión promedio P_{prom} , el centro de presión y fuerza resultante, podemos utilizar esta misma ilustración para guiarnos en el comportamiento de las presiones en el túnel hidrodinámico.



Fuente: Realizada por el Autor. Ilustración 32 del actual documento.

La P_{prom} es la presión promedio y A es el área total de la pared, por lo tanto como la presión promedio se encuentra en la mitad de la altura del agua con respecto a la pared esta se puede hallar por medio de la siguiente ecuación;

Ecuación 25

$$P_{prom} = \gamma \left(\frac{h}{2} \right)$$

Donde h es la profundidad del fluido en el caso de nuestro proyecto como las paredes se definieron de 30 centímetros de altura, tomaremos una altura del fluido de 28 centímetros y el peso específico del agua $\gamma=9.81 \text{ kN/m}^3$ por lo tanto la P_{prom} del agua en la sección de visualización para las paredes laterales será;

$$P_{prom} = \left(9.8 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \right) \left(\frac{0.28\text{m}}{2} \right) = 1.37 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 1.37 \text{ kPa}$$

Y la fuerza resultante F_R se obtendrá al multiplicar P_{prom} por el área de la pared recordemos que la sección de visualización es de 1m de largo por lo tanto $A = 1\text{m} * 0.28\text{m} = 0.28\text{m}^2$ entonces;

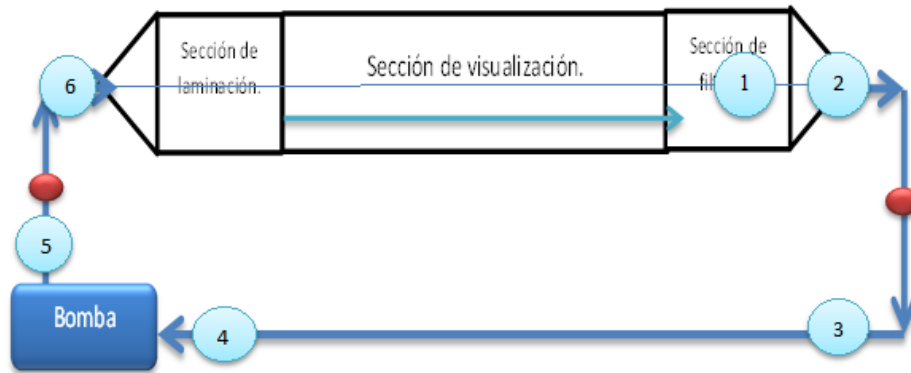
$$F_R = P_{prom}A = 1.37 \text{ kPa} * 0.28\text{m}^2 = 0.3836 \text{ kN}$$

Como el material de la sección de visualización es PMMA, este material no tendrá ningún problema con la presión de 1.37kPa dado que el PMMA tiene un módulo de elasticidad de 3300MPa según documento publicado por la universidad de Valladolid⁶⁰, por lo tanto la presión ejercida por el fluido no será problema.

Ahora se calculará las presiones en distintos puntos del circuito de tubería del proyecto, esto para verificar que las presiones sean apropiadas y prevenir daños al sistema.

⁶⁰<http://www.eis.uva.es/~macromol/curso03-04/PMAM/PROPIEDADES.htm>

Ilustración 82 Puntos para estudio de presiones en el sistema.



Fuente: Realizada por el Autor.

Como ya tenemos el valor inicial en el punto 1, donde la presión es de 1.37kPa, ahora podemos determinar las presiones en los diferentes puntos propuestos desde el punto 2 al 6 gracias a la ecuación de Bernoulli tenemos:

Tabla 25 Presiones en los distintos puntos de estudio del sistema. Aplicación ecuación Bernoulli.

Cálculos de presión en diferentes puntos del sistema. ESTÁTICO									
		peso específico		altura(interna)		presión		diámetro de tubería	área de tubería
salida de sección de visualización	P1	9.81	kN/m ³	0.14	m	1.37340000	kPa	0.3	0.09
Altura									
tubería, en sentido del futuro flujo	P2	9.81	kN/m ³	1.2	m	1.37340000	kPa	0.05	0.0025
	P3	9.81	kN/m ³	0	m	13.14540000	kPa	0.05	0.0025
	P4	9.81	kN/m ³	0	m	13.14540000	kPa	0.0254	0.00064516
	P5	9.81	kN/m ³	-0.2	m	13.14540000	kPa	0.0254	0.00064516
	P6	9.81	kN/m ³	-1.2	m	1.37340000	kPa	0.0254	0.00064516

Fuente: Realizada por el Autor.

La Tabla 25 muestra las diferentes presiones en los puntos de estudio del circuito que se ven en la Ilustración 82. En la tabla los puntos 1, 2, y 6 tienen el mismo valor de presión, esto se da a que la altura en el que están es la misma y en estado estático. Para comprobar esto utilizaremos la ecuación de Bernoulli. La presión encontrada en la sección de visualización a la altura del punto 1 es 1.3734 kPa, hallaremos la presión en el punto 2 y 3;

$$\left(\frac{P_1}{\gamma}\right) + (Z_1) + \left(\frac{v_1^2}{2g}\right) = \left(\frac{P_2}{\gamma}\right) + (Z_2) + \left(\frac{v_2^2}{2g}\right)$$

$$\left(\frac{1.3734 \text{ kPa}}{9.8 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}}\right) + (1.2\text{m}) + \left(\frac{0^2}{2g}\right) = \left(\frac{p_2}{9.8 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}}\right) + (1.2\text{m}) + \left(\frac{0^2}{2g}\right)$$

En la anterior ecuación podemos ver que al no haber una velocidad en el sistema el reemplazo se hizo como cero '0' y la altura de 1.2 se toma desde la referencia de la línea más baja del sistema. Por lo tanto.

$$\left(\frac{1.3734 \text{ kPa}}{9.8 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}}\right) = \left(\frac{p_2}{9.8 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}}\right)$$

$$p_2 = 1.3734 \text{ kPa}$$

Hallando p3.

$$\left(\frac{1.3734 \text{ kPa}}{9.8 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}}\right) + (1.2\text{m}) = \left(\frac{p_3}{9.8 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}}\right) + (0.0\text{m})$$

$$\left(\frac{1.3734 \text{ kPa}}{9.8 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}}\right) + (1.2\text{m}) = \left(\frac{p_3}{9.8 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}}\right)$$

$$p_3 = 13.14 \text{ kPa}$$

Al comparar el anterior resultado con los valores de la Tabla 25 Podemos ver que coinciden los valores de forma cercana, los valores en computadora pueden variar al ser más exactos y tener más decimales, pero con la ecuación de Bernoulli

pudimos hallar los valores de los diferentes puntos seleccionados anteriormente en el sistema. La presión más alta del sistema se aprecia en la parte más baja de este con un valor de 13.14kPa, siendo un valor pequeño y no representa un riesgo para el sistema en sus tuberías.

Al tener los valores de presión en el sistema en estado estático debemos analizarlo en movimiento, donde se encontrarán varios factores importantes que se deben tener en cuenta como, las pérdidas y ganancias de energía, el aumento de presiones en los diferentes puntos predeterminados para poder así analizar también que efectos produce la bomba.

5.5. ELECCIÓN DE BOMBA.

Las especificaciones de las bombas centrífugas usualmente vienen en litros por minuto por lo tanto debemos realizar las respectivas conversiones.

$$Q = Av$$

Donde $A = \text{área}$, $Q = \text{flujo volumétrico}$, y $v = \text{velocidad}$. Como la sección principal es la de visualización y se debe asegurar el flujo laminar se aplica el área transversal de esta sección. Esta es de 0.3m en todos sus lados, el área es $A = 0.09m^2$, por lo tanto podemos hallar el caudal,

$$Q = (0.09m^2) \left(8.72 \times \frac{10^{-3}m}{s} \right) = 7.848 \times 10^{-4} \frac{m^3}{s}$$

Ecuación 63 Flujo volumétrico mínimo para la bomba del sistema.

$$Q = 4.7 \times 10^{-2} \left(\frac{m^3}{min} \right) = 47 \text{ lt/min}$$

5.5.1. Potencia requerida en la bomba para el sistema. Usualmente las bombas ya vienen con unos flujos de volumen predeterminados, por lo tanto se puede escoger una bomba con mayor o menor flujo. Claro está que se debe tener en cuenta que el flujo no supere por mucho el flujo máximo pues provocaría turbulencia en la zona de visualización. En el capítulo 4 en la Ilustración 53 se muestra una bomba de ejemplo la cual es perfecta para implementarla en el túnel.

$$P_A = h_A \gamma Q$$

$$P_A = 2.840m * \frac{9.81kN}{m^3} * 7.848 \times \frac{10^{-4}m^3}{s} = 0.0218kW = 0.029hp$$

Las características de la bomba son;

$$Q_B = 50lt/min$$

$$Potencia = 1HP$$

$$Diámetro de entrada = 1"$$

$$Diámetro de salida = 1"$$

$$v_B = \frac{Q_B}{A} = \frac{(0.000833) \left(\frac{m^3}{s}\right)}{0.09m^2} = 9.25 \times 10^{-3} \left(\frac{m}{s}\right)$$

$$N_R = \frac{9.25 \times 10^{-3} \left(\frac{m}{s}\right) (0.3m) \left(\frac{1000Kg}{m^3}\right)}{1.308 \times \frac{10^{-3}Kg}{ms}} = 2121.55$$

Al tener una potencia de 1hp, podemos hallar de forma hipotética la energía disponible que se encontrará en el sistema, por lo tanto;

Ecuación 64 Potencia disponible.

$$P_A = h_A \gamma Q$$

Ecuación 65 Energía disponible en relación a la potencia de la bomba.

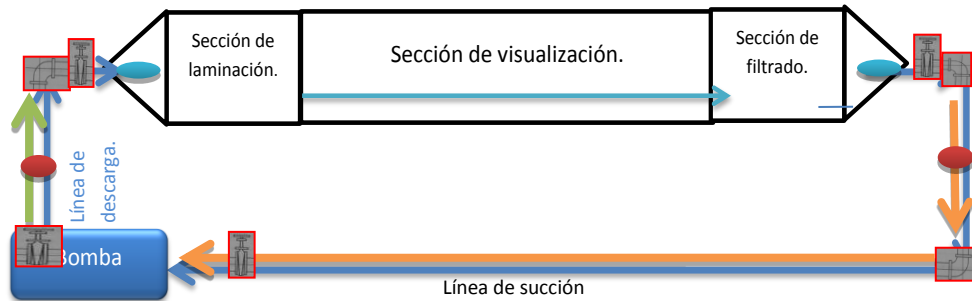
$$h_A = \frac{\gamma Q}{P_A}$$

$$h_A = \frac{9.8 \left(\frac{kN}{m^3}\right) * (8.333 \times 10^{-4}) \left(\frac{m^3}{s}\right)}{0.7457 \left(\frac{kNm}{s}\right)} = 0.010947m$$

El término h_A se puede hallar de forma más exacta después de hallar las pérdidas de energía y aplicando la ecuación de energía.

5.6. PÉRDIDAS DE ENERGÍA

Con el propósito de identificar los distintos puntos donde se hallan pérdidas de energía mencionaremos las convenciones del circuito, que se ven en la ilustración siguiente.



Fuente: Realizada por el Autor.

h_1 = Pérdida a la entrada del sistema



h_2 = Pérdida en la línea de succión.



h_3 = Pérdida de energía en válvulas.



h_4 = Pérdida de energía en codos.



h_5 = Pérdida por fricción en la línea de descarga.



h_6 = Pérdida de energía en la salida.



h_7 = Pérdida de energía en reductores.



h_8 = Pérdida de energía en la sección de visualización.

5.6.1. Pérdida en la entrada h_1 . Para poder hallar la pérdida de energía debemos tener en cuenta el valor que aparece según la tabla de Moody donde el factor de fricción para nuestro tipo de material PVC o plástico que también aplica para el PMMA, es de $f = 0.0030$, en la curva de tubería nueva y lisa, cabe anotar que debemos verificar este valor al dar ciertos parámetros a la bomba. Usaremos los siguientes con el fin de garantizar que exista un flujo laminar en la sección de visualización, como se vio en la sección 5.2.

Aplicando la Ecuación 45 tenemos,

$$h_1 = K \left(\frac{v^2}{2g} \right)$$

Cabe recordar que K es el coeficiente de resistencia donde este equivale a,

$$K = f \left(\frac{L}{D} \right)$$

Tenemos que el número Reynolds es;

$$N_R = \frac{vD\rho}{\eta} \dots \dots \dots v = \frac{N_R\eta}{D\rho}$$

Como el número Reynolds máximo en esta sección es de 2000, el $D = 30\text{cms}$, la densidad del agua $\rho = 1000\text{kg}/\text{m}^3$ y la viscosidad absoluta es $\eta = 0.0013080\text{ kg}/(\text{m.s})$, podemos hallar la velocidad,

$$v = \frac{2000 \times 0.0013080}{0.30 \times 1000}$$

$$v = 8.72 \times 10^{-3} \text{ m/s}$$

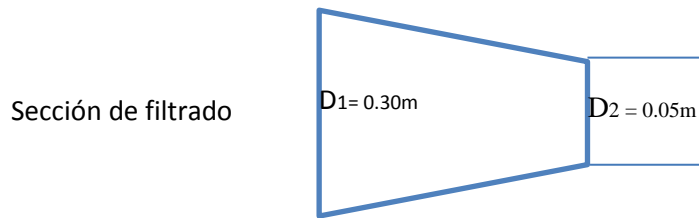
La ecuación resultante para hallar la pérdida de energía de h_1 es;

Ecuación 66 Pérdida de energía en la sección de visualización.

$$h_1 = f \left(\frac{L}{D} \right) \left(\frac{v^2}{2g} \right)$$

Como h_1 representa la entrada al circuito de tuberías donde la sección de filtrado y la tubería se unen, la geometría de este se toma como un accesorio de contracción gradual, por lo tanto el término L/D se reemplaza por la relación de diámetros D_1/D_2 de este tipo de accesorio por lo tanto...

Ilustración 83 relación de diámetros.



Fuente: Realizada por el Autor.

...Por lo tanto;

$$\frac{D_1}{D_2} = \frac{0.3m}{0.05m} = 6 \quad K = 0.0030 \times 6 = 0.18$$

$$h_1 = 0.18 \left(\frac{\left(9.25 \times \frac{10^{-3}m}{s} \right)^2}{2(9.81)} \right) = 7.8497 \times 10^{-7}m$$

5.6.2. Pérdida de energía en la línea de succión. Características de la línea de succión,

Longitud $L = 2.5m$

Diámetro $D = 2" = 0.05m$

Área $A = 1.96 \times 10^{-3}m^2$

$f = 0.030$

$v = ?$

Sección de tubería de 2" h_{2_2} "

Longitud $L = 1.4m$

Diámetro $D = 1" = 0.0254m$

Área $A = 0.000506709m^2$

$f = ?$

$v = ?$

Sección de tubería de 1" h_{2_1} "

La velocidad para este punto debemos hallarla utilizando la ecuación de continuidad por lo tanto;

$A_1v_1 = A_2v_2$, reemplazando valores tenemos,

$$(0.09m^2)(9.26 \times 10^{-3})m/s = (1.96 \times 10^{-3}m^2)v$$

$$v_2 = \frac{8.334 \times 10^{-4} \left(\frac{m}{s} \right)}{1.96 \times 10^{-3}m^2} = 0.4252 m/s$$

Ahora para corroborar el valor del factor de fricción de la tabla de Moody, aplicaremos la Ecuación 44 de Swamee y Jain,

$$f = \frac{0.25}{\left[\log\left(\frac{1}{3.7\left(\frac{D}{\epsilon}\right)} + \frac{5.74}{N_R^{0.9}}\right)\right]^2}$$

Para poder definir la rugosidad relativa D/ϵ , debemos aplicar el valor que se ve en la Tabla 10 de $\epsilon = 0.0015\text{mm}$, y el diámetro de la primera sección de succión de la tubería $D = 0.05\text{m}$ por lo tanto;

$$\frac{D}{\epsilon} = \frac{0.0000015\text{m}}{0.05\text{m}} = 33,333.33$$

Ecuación 67 Número Reynolds para la línea de succión. Diámetro 2".

$$N_R = \frac{(0.4252\text{ m/s})(0.05\text{m})\left(1000\left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)\right)}{1.308 * 10^{-3}\left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)} = 16,253.82 \text{ Turbulento}$$

Ecuación 68 Factor de fricción línea de succión diámetro de 2".

$$f_{2"} = \frac{0.25}{\left[\log\left(\frac{1}{3.7(33,333.33)} + \frac{5.74}{16253.82^{0.9}}\right)\right]^2} = 0.0272959933$$

Como se puede ver en la Ecuación 68, el factor de fricción para una tubería de 2" $f_{2"}$, se acerca al valor tomado de la tabla de Moody, sin embargo podemos pensar que la ecuación es más exacta que el diagrama dado que en el diagrama es casi imposible ser exacto.

Ahora debemos hallar el factor de fricción para la tubería de 1", por lo que debemos averiguar una vez más el valor de v , NR y $f_{1"}$ por lo que obtenemos.

Ecuación 69 Número Reynolds para la línea de succión. Diámetro 1".

$$N_R = \frac{(1.64439\text{ m/s})(0.0254\text{m})\left(1000\left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)\right)}{1.308 * 10^{-3}\left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)} = 31,932.359$$

Ecuación 70 Factor de fricción línea de succión diámetro de 1".

$$f_{1''} = \frac{0.25}{\left[\log\left(\frac{1}{3.7(33,333.33)} + \frac{5.74}{31,932.359^{0.9}}\right)\right]^2} = 0.023217298$$

Teniendo los valores necesarios para obtener h_2 reemplazamos,

Ecuación 71 Pérdida de energía línea de succión.

Aplicando la ecuación de continuidad podemos hallar la velocidad en la tubería de 1", en este caso $v = 1.644390774$

$$h_2 = h_{2_{1''}} + h_{2_{2''}}$$

$$h_2 = f_s \left(\frac{L}{D}\right) \left(\frac{v^2}{2g}\right)$$

Ecuación 72 Pérdida de energía en tubería de 1".

$$h_{2_{1''}} = 0.023217298 \left(\frac{1.4m}{0.0254m}\right) \left(\frac{\left(1.644390774 \frac{m}{s}\right)^2}{2 \left(\frac{9.81m}{s^2}\right)}\right) = 0.17628m$$

Ecuación 73 Pérdida de energía en tubería de 2".

$$h_{2_{2''}} = 0.027295993 \left(\frac{2.5m}{0.025m}\right) \left(\frac{\left(0.4252 \frac{m}{s}\right)^2}{2 \left(\frac{9.81m}{s^2}\right)}\right) = 0.012575m$$

Reemplazando Ecuación 72 y Ecuación 73 en la Ecuación 71.

$$h_2 = 0.17628m + 0.012575m = 0.18885m$$

5.6.3. Pérdida de energía en las válvulas h_3 . Características de ésta sección.

- Cantidad de válvulas de diámetro de 1" = 3
- Cantidad de válvulas de diámetro de 2" = 1
- Longitud equivalente $Le/D = 340$ *
(Tabla 16 Longitud equivalente en diámetros de tubería.)
- $f_{2''} = 0.02729$ Ecuación 73. $f_{1''} = 0.02321$ Ecuación 72.

Como se aprecia en la Tabla 16 a los accesorios les corresponde un valor de longitud equivalente, esto se refiere a que los accesorios producen una pérdida de energía equivalente a una tubería a cierta longitud y con el mismo diámetro interno.

Ahora podemos proceder a obtener los valores correspondientes para poder obtener h_3 .

Ecuación 74 Pérdida de energía en válvulas de 1".

$$h_{3_{1''}} = 2 \left(f \left(\frac{L_s}{D} \right) \left(\frac{v^2}{2g} \right) \right) = 2(0.02321)(340) \left(\frac{\left(1.6443 \frac{m}{s} \right)^2}{\left(2 \left(9.81 \left(\frac{m}{s^2} \right) \right) \right)} \right) = 2.17m$$

Ecuación 75 Pérdida de energía en válvulas de 2".

$$h_{3_{2''}} = 2 \left(f \left(\frac{L_s}{D} \right) \left(\frac{v^2}{2g} \right) \right) = 2(0.02729)(340) \left(\frac{\left(0.4252 \frac{m}{s} \right)^2}{\left(2 \left(9.81 \left(\frac{m}{s^2} \right) \right) \right)} \right) = 0.17m$$

Ecuación 76 Pérdida de energía total en válvulas.

$$h_3 = h_{3_{1''}} + h_{3_{2''}} = 2.17m + 0.17m = 2.345m$$

5.6.4. Pérdidas de energía en codos de 90° h_4 . Características de esta sección,

- Número de codos de 2" = 2
- Número de codos de 1" = 1
- Longitud equivalente $Le/D = 30$ (según tabla 10.)
- $f_{2''} = 0.02729$; $f_{1''} = 0.02321$

Ecuación 77 Pérdida de energía en codos de 90° Diámetro de 1".

$$h_{4_{1''}} = \left(f \left(\frac{L_s}{D} \right) \left(\frac{v^2}{2g} \right) \right) = (0.02321)(30) \left(\frac{\left(1.6443 \frac{m}{s} \right)^2}{\left(2 \left(9.81 \left(\frac{m}{s^2} \right) \right) \right)} \right) = 0.09595m$$

Ecuación 78 Pérdida de energía en codos de 90° Diámetro de 2".

$$h_{4_{2''}} = 2 \left(f \left(\frac{L_s}{D} \right) \left(\frac{v^2}{2g} \right) \right) = 2(0.02729)(30) \left(\frac{\left(0.4252 \frac{m}{s} \right)^2}{\left(2 \left(9.81 \left(\frac{m}{s^2} \right) \right) \right)} \right) = 0.015m$$

Ecuación 79 Pérdida de energía total en codos de 90°

$$h_4 = h_{4_{1''}} + h_{4_{2''}} = 0.09595m + 0.015m = 0.111m$$

5.6.5. Pérdida por fricción en la línea de descarga h_5 . Características de ésta sección,

- Longitud tubería de 1" = 0.6m
- Longitud tubería de 2" = 0.8m
- $f_{2''} = 0.02729$; $f_{1''} = 0.02321$

Ecuación 80 Pérdida por fricción en la línea de descarga. Diámetro 1".

$$h_{5_{1''}} = \left(f \left(\frac{L_s}{D} \right) \left(\frac{v^2}{2g} \right) \right) = (0.02321) \left(\frac{0.6m}{0.0254} \right) \left(\frac{\left(1.6643 \frac{m}{s} \right)^2}{2 \left(9.81 \left(\frac{m}{s^2} \right) \right)} \right) = 0.00755m$$

Ecuación 81 Pérdida por fricción en la línea de descarga. Diámetro 2".

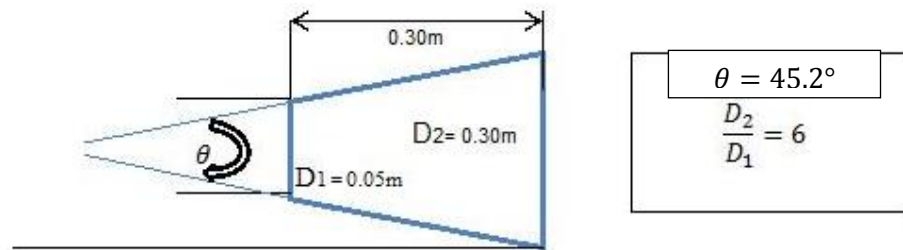
$$h_{5_{2''}} = \left(f \left(\frac{L_s}{D} \right) \left(\frac{v^2}{2g} \right) \right) = 2(0.02729) \left(\frac{0.8m}{0.05m} \right) \left(\frac{\left(0.4252 \frac{m}{s} \right)^2}{2 \left(9.81 \left(\frac{m}{s^2} \right) \right)} \right) = 4.02 * 10^{-3}m$$

Ecuación 82 Pérdida total por fricción en la línea de descarga.

$$h_5 = h_{5_{1''}} + h_{5_{2''}} = 0.00755m + 4.02 * 10^{-3}m = 0.07957m.$$

5.6.6. Pérdida en la salida (expansión gradual) h_6 . Características de ésta sección. El cálculo de pérdida de energía en esta sección es similar al realizado en el análisis de h_1 , donde debemos tener el valor del ángulo de cono θ y la relación de diámetros D_1/D_2 , estos valores se obtiene de la Tabla 12.

Ilustración 85 Dimensiones del difusor (expansión gradual).



Fuente: Realizada por el Autor.

Como la relación de diámetros es 6 usamos el valor de ∞ de la Tabla 12, y $45^\circ.2$ de ángulo de cono para poder hallar el valor aproximado de h_6 , por lo tanto según la tabla $K=0.64$.

Ecuación 83 Pérdida de energía en la salida.

$$h_6 = K \left(\frac{v^2}{2g} \right) = 0.64 \left(\frac{9.26 * 10^{-3} \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2}{2 \left(9.81 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) \right)} \right) = 2.7970 * 10^{-6} \text{m (despreciable)}$$

La pérdida de energía en este caso es tan baja que es despreciable, y se debe a la configuración del accesorio de expansión gradual, además este tipo de accesorio no es típico pues se diseñó exclusivamente para este proyecto.

5.6.7. Pérdidas de energía en reductores h_7 . Características de esta sección.

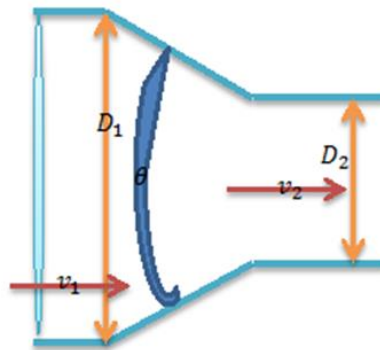
En el sistema que estamos desarrollando se encuentran dos secciones en las que se necesitan reductores, estos se refieren al accesorio que proporciona un cambio de diámetros en el circuito de la tubería, es decir como el sistema utiliza dos tipos de diámetros necesitamos realizar el debido cambio para que la tubería apropiada encaje con los requerimientos de las bombas usuales para un caudal como el deseado en el proyecto.

Aunque los reductores en el sistema tendrán las mismas características físicas, el cálculo de la pérdida de energía debe realizarse por separado dado que una actúa como contracción gradual y la otra como expansión gradual, similar al estudiado en la anterior pérdida de energía en h_6 , así que analizaremos primero el de contracción gradual y luego el de expansión.

a. Reductor Contracción gradual h_{7c} .

La pérdida de energía en un reductor puede ser alta o baja según su grado contracción, si ésta se realiza de forma gradual es decir un ángulo de cono apropiado este se encuentra usualmente en ángulos amplios, cuando estos ángulos son muy pequeños la contracción se hace muy larga lo que produce más pérdidas por fricción.

Ilustración 86 Contracción Gradual.



Fuente: Realizada por el Autor.

Como se vio anteriormente el ángulo de cono θ nos ayuda a determinar el coeficiente resistencia K , en este caso para el tipo de reductor usado es típico que tenga un ángulo entre los 50 y 70 grados, dependiendo de los diámetros para nuestro caso el utilizaremos el ángulo de 60° y para esto usaremos la siguiente Tabla 15, para poder determinar el coeficiente de resistencia y así poder obtener las pérdidas de este accesorio.

Según la Tabla 15 el coeficiente de resistencia para este tipo de accesorio se aproxima a $K=0.08$ para una relación de diámetros $D_1/D_2=2.0$ dado que el cambio de tuberías es de 2" a 1", por lo tanto la pérdida de energía es.

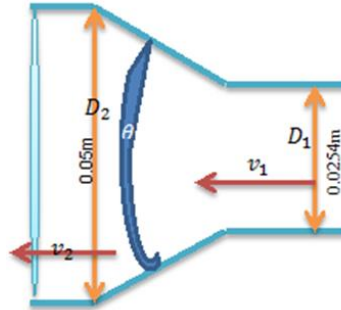
Ecuación 84 Pérdida de energía contracción gradual.

$$h_{7c} = 0.08 \left(\frac{1.6443 \left(\frac{m}{s} \right)^2}{2 \left(9.81 \left(\frac{m}{s^2} \right) \right)} \right) = 0.011m$$

b. Reductor Expansión gradual h_{7e} .

En este caso se realiza el mismo procedimiento que hizo en el análisis de h_6 , donde nos basamos en el ángulo de cono y la relación de diámetros para poder obtener el valor de K , aunque es un reductor en realidad en esta sección se debe tomar como una expansión gradual por causa de la orientación del flujo.

Ilustración 87 Expansión Gradual.



Fuente: Realizada por el Autor.

El accesorio al igual que el anterior tiene un ángulo de cono promedio de $\theta=60^\circ$ y su relación de diámetros es $D_2/D_1=2$, el valor del coeficiente de resistencia $K=0.68$ -Tabla 12- por lo tanto tenemos que;

Ecuación 85 Pérdida de energía en la expansión gradual.

$$h_{7s} = K \left(\frac{v^2}{2g} \right) = 0.68 \left(\frac{0.4252 \left(\frac{m}{s} \right)^2}{2 \left(9.81 \left(\frac{m}{s^2} \right) \right)} \right) = 6.2660 * 10^{-3} m$$

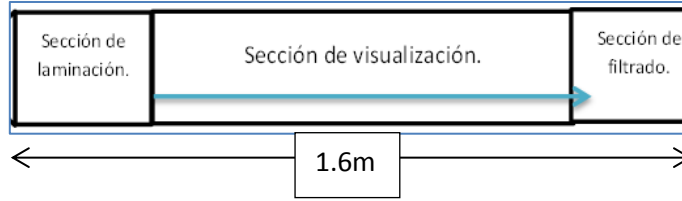
Ahora podemos sumar las pérdidas de ambos accesorios y así obtener h_7 .

Ecuación 86 Pérdida de energía total en reductores.

$$h_7 = h_{7c} + h_{7s} = 0.011m + 6.2660 * 10^{-3}m = 0.11626m$$

5.6.8. Pérdida de energía en la sección de visualización h_8 . En esta sección el flujo debe ser laminar para que el objeto del prototipo sea eficaz, por lo tanto para hallar el factor de fricción f en esta sección debemos aplicar la ecuación de *Darcy* $f = 64/N_R$, y como el punto máximo para la garantizar el flujo laminar es un número Reynolds de 2000, entonces tenemos,

Ilustración 88 Sección principal del túnel.



Fuente: Realizada por el Autor.

$$f = \frac{64}{N_R} = \frac{64}{2000} = 0.032$$

Ahora la relación L/D para esta sección debe tomarse la longitud total incluyendo la sección de laminación y de filtrado, una longitud de 1.6m en este caso como la sección es cuadrada y no circular, el diámetro de debe tomar como radio hidráulico R , y este a su vez se obtiene $R=A/PM$ donde A = área, PM =perímetro mojado, el PM es la suma de los lados de la sección transversal.

$$h_8 = f \left(\frac{L}{4R} \right) \left(\frac{v^2}{2g} \right)$$

Por lo tanto.

Ecuación 87 Pérdida de energía en la sección de visualización, laminación y filtrado.

$$h_8 = 0.032 \left(\frac{1.6m}{4 \left(\frac{0.09m^2}{0.9m} \right)} \right) \left(\frac{\left(0.009256759 \frac{m}{s} \right)^2}{2 \left(9.81 \frac{kg}{s^2} \right)} \right) = 6.039 * 10^{-5} (despreciable)$$

En este momento ya se completa el análisis de pérdidas de energía en las diferentes secciones del sistema, ahora debemos hallar el valor de la pérdida de energía total h_L .

$$h_L = h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_5 + h_6 + h_7 + h_8$$

Ecuación 88 Pérdida total del sistema.

$$h_L = 3.49 \times 10^{-6}m + 0.1888m + 2.345m + 0.111m + 0.07957 + 2.7970 \times 10^{-6} + 0.11626m + 6.039 \times 10^{-5}$$

$$h_L = 2.840m$$

5.7. VARIACIÓN DE PRESIONES EN EL CIRCUITO DEL TÚNEL DEBIDO AL FLUIDO EN MOVIMIENTO

Al obtener este valor podemos retomar Ecuación 30 donde se realiza una extensión a la ecuación de Bernoulli.

$$\frac{p_1}{\gamma} + z + \frac{v_1^2}{2g} + h_A - h_L = \frac{p_1}{\gamma} + z + \frac{v_2^2}{2g}$$

Esta ecuación la podemos aplicar para el punto más crítico que es antes y después de la bomba pues es donde se genera un aumento de energía como también de presiones y velocidades. En los puntos predeterminados en el sistema como el punto número 4 y 5 es donde aplicaremos la ecuación, debemos recordar que se escogió una bomba con ciertas características entre las cuales se habla de una carga máxima de la bomba de $h_A = 50m$ sin embargo como el caudal que se necesita es de $q = 47lt/m$ la carga será $h_A = 12m$ según gráfica de la Ilustración 53, y una pérdida total de energía de $h_L = 2.840m$. Además como comenzaremos desde el punto 4 y 5, tomaremos el instante donde comienza el funcionamiento de la bomba, por lo tanto en el punto 4 no existe aún velocidad, pero si una presión inicial y el punto 5 será donde se verá la afectación por la acción de la bomba agregando energía, y causando una velocidad y un aumento en presiones a lo largo del circuito. De esta manera aplicando los valores tenemos.

$$\frac{p_4}{\gamma} + z + \frac{v_4^2}{2g} + h_A - h_L = \frac{p_5}{\gamma} + z + \frac{v_5^2}{2g}$$

Sabemos que la bomba elegida tiene un caudal de 50lt/min, por lo tanto con esa información podemos hallar la velocidad que se generará en el punto 5. También debemos usar la altura en la que se encuentra el punto 5 el cual se determinó que está a 0.2m del nivel de referencia que es el punto más bajo del sistema (altura estándar de la bomba). El punto 4 como se encuentra en el nivel de referencia se toma a una altura $z = 0m$.

$$\frac{13.1454kPa}{\left(9.81 \frac{kg}{m^3}\right)} + 0m + \frac{1.643 \frac{m^2}{s^2}}{2 \left(9.81 \frac{m}{s^2}\right)} + 12m - 2.840m = \frac{p_5}{9.81 \frac{kN}{m^3} m} + 0.2m + \frac{1.643 \frac{m}{s^2}}{2 \left(9.81 \frac{m}{s^2}\right)}$$

Ecuación 89 Presión después de la bomba en el instante inicial de funcionamiento.

$$p_5 = 101.1031kPa$$

Ahora podemos aplicar la ecuación general de la energía para hallar las diferentes presiones alrededor del circuito del túnel, con ayuda del programa de Excel obtuvimos las siguientes presiones.

Tabla 26 Presiones en diferentes puntos del sistema.

Cálculos de presión en diferentes puntos del sistema. Movimiento									
	head (m)	Q		Altura	m	velocidad	m/s	presión	kPa
Información de la bomba.	12	50.00000000	Lt/min						
tubería, en sentido del futuro flujo	P4	0.00083330	m^3/s	0	m	1.64453474	m/s	103.1031	kPa
	P5	0.00083330	m^3/s	0.2	m	1.64453474	m/s	101.1411	kPa
	P6	0.00083330	m^3/s	1.2	m	1.64453474	m/s	91.3311	kPa
	P1	0.00083330	m^3/s	1.2	m	0.00925889	m/s	92.68330	kPa
	P2	0.00083330	m^3/s	1.2	m	0.42439521	m/s	92.59329	kPa
	P3	0.00083330	m^3/s	0		0.42439521	m/s	104.3653	kPa
pérdida de energía (hl) mts	2.84								

Fuente: Realizada por el Autor.

5.8. CARGA DINÁMICA TOTAL h_a

Usualmente la diferencia de cargas de elevación se realiza entre el depósito de origen y el de destino, el túnel al recircular agua esta diferencia se hace cero al ser el destino y origen el mismo. El valor de la carga de presión se toma usualmente del depósito destino, y puede tomarse en un lugar que coincida en ambos puntos, como las superficies por ejemplo.

$$h_a = (z_2 - z_1) + \frac{p_1}{\gamma} + h_L$$

Ecuación 90 Carga dinámica total.

$$h_a = (1.2 - 1.2) + \left(\frac{92.6830}{9.8} \right) + 2.840 = 12.28m$$

La carga estática total es la diferencia de cargas entre origen y destino, por lo tanto en el caso del túnel este daría cero por ser un sistema recircular.

5.9. CÁLCULO DEL NPSH DEL TÚNEL Y SISTEMA

Para el desarrollo de este cálculo se debe seguir ciertos pasos para poder obtener información teórica del comportamiento del sistema.

a. Especificaciones del sistema.

fluido = Agua

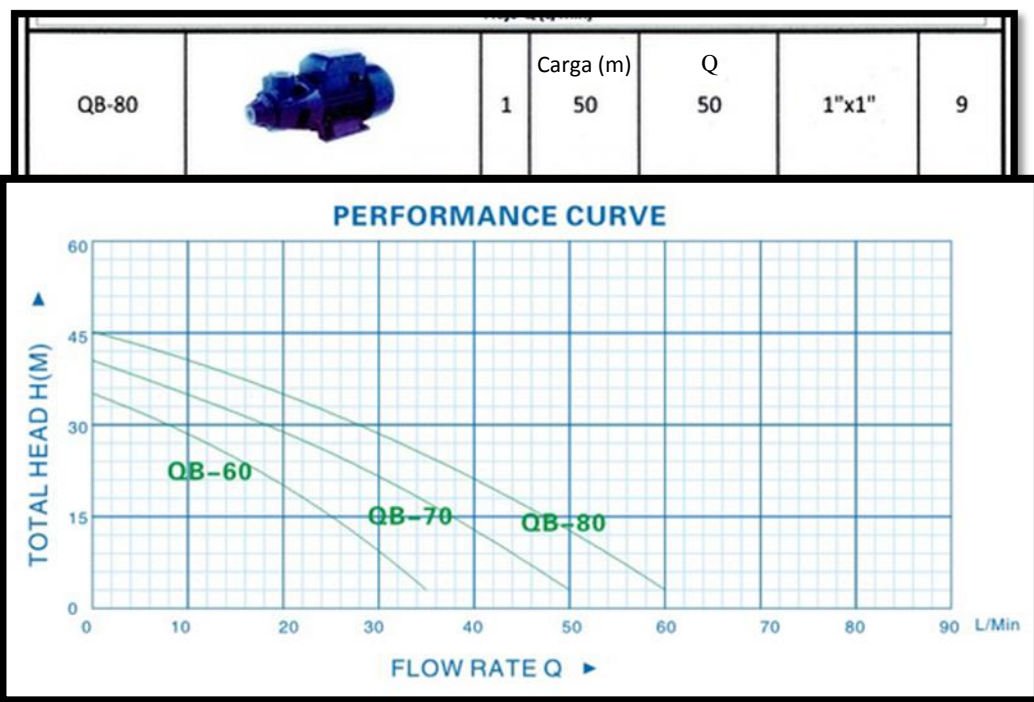
temperatura = 10° C

$$Q = 8.3 \times 10^{-4} \frac{m^3}{s}$$

fuelle: depósito superior (sección de visualización)

destino : sistema recircular (fuente).

elevación del depósito por encima de la entrada de la bomba = 1.2 m.



a. Propiedades del fluido.

agua a 10°C

$$\gamma = 9.81 \frac{kN}{m^3}$$

$$\eta = 0.001308 \frac{Kg}{m.s}$$

Carga de presión de vapor del líquido a la temperatura de bombeo h_{vp} .

Ecuación 91 Carga de presión de vapor del líquido.

$$h_{vp} = \frac{P_{vp}}{\gamma} = \frac{1.228 kPa}{9.81 \left(\frac{kN}{m^3} \right)} = 0.1254 \text{ (Tabla 20)}$$

Carga de presión estática h_{sp} .

Ecuación 92 Carga de presión estática.

$$h_{sp} = \frac{P_{abs}}{\gamma}$$

Ecuación 93 Presión absoluta.

$$P_{abs} = P_{atm} + P_{man}$$

En el análisis del sistema podemos comparar si es conveniente que se encuentre o no expuesto a la presión atmosférica, por lo tanto tenemos,

$$P_{abs\ 1} = P_{atm, bogotá} + P_{man\ tabla\ 26}$$

Ecuación 94 Presión absoluta (sistema expuesto a la atmósfera).

$$P_{abs\ 1} = 73.759 \left(\frac{kN}{m^2} \right) + 103.1031 \left(\frac{kN}{m^2} \right) = 176.86 kPa.$$

Presión absoluta sin exposición a la atmósfera.

$$P_{abs\ 2} = P_{man\ tabla\ 26}$$

Ecuación 95 Presión absoluta (sistema cerrado sin exposición a la atmósfera).

$$P_{abs\ 2} = 103.1031 kPa.$$

Por lo tanto podemos hallar la carga de presión estática h_{sp} .

$$h_{sp\ 1} = \frac{P_{abs\ 1}}{\gamma} = \frac{176.86 kPa}{9.81 \left(\frac{kN}{m^3} \right)} = 18.02m$$

$$h_{sp\ 2} = \frac{P_{abs\ 2}}{\gamma} = \frac{103.1031 kPa}{9.81 \left(\frac{kN}{m^3} \right)} = 10.51m$$

Elevación del tanque h_s ,

$h_s = 1.2m$ por encima de la bomba por lo tanto se toma una elevación positiva.

Pérdida por fricción hallada h_L o h_f ,

$$h_f = 2.84m$$

Cálculo de $NPSH_A$, pero como tenemos dos diferentes situaciones por la carga de presión de vapor, hallamos ambas cargas para comparación;

Ecuación 96 NPSH disponible

$$NPSH_{A1} = h_{sp1} \pm h_s - h_f - h_{vp}$$

$$NPSH_{A1} = 18.01m + 1.2m - 2.84m - 0.1254m = 16.24m$$

$$NPSH_{A2} = h_{sp2} \pm h_s - h_f - h_{vp}$$

$$NPSH_{A2} = 10.51m + 1.2m - 2.84m - 0.1254m = 8.7446m$$

Cálculo para hallar la carga de succión neta requerida $NPSH_R$,

$$NPSH_A > 1.10NPSH_R$$

Al reordenar tenemos,

$$NPSH_A / 1.10 > NPSH_R$$

$$NPSH_{R1} < \frac{16.24m}{1.10} = 14.76$$

$$NPSH_{R2} < \frac{8.7446m}{1.10} = 7.95$$

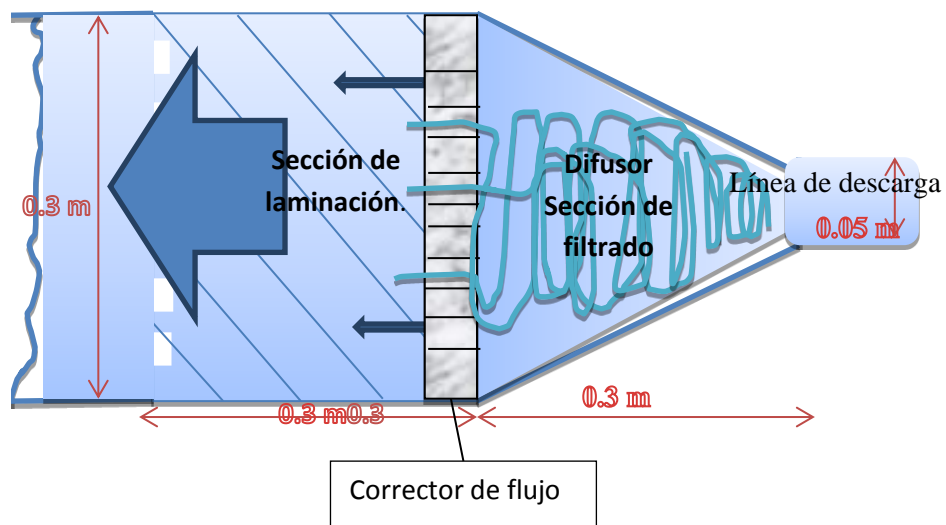
Al comparar que el NPSH disponible es mayor que el requerido y mayor que la presión de vapor garantiza que no haya posibilidad de cavitación en la bomba y así proteger la integridad del sistema.

Puede notarse en la gráfica de rendimiento de la bomba que a menor caudal mayor será la carga de presión o de energía que esta provee.

5.10. SECCIÓN DE LAMINACIÓN O ASENTAMIENTO DE FLUJO

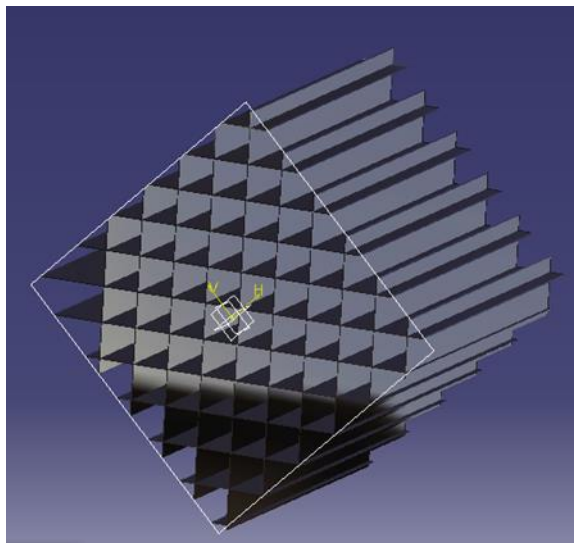
La sección de laminación es la encargada de corregir el flujo que proviene de la línea de descarga, este viene en flujo turbulento y además con un movimiento rotacional debido a la energía agregada de la bomba sumado al desplazamiento a través de la línea de descarga, por tal motivo justo después del difusor se incorpora un corrector de flujo, este se encarga de quitar esa energía rotacional que a su vez ya ha sido disminuida gracias a la acción del difusor al reducir su velocidad y se complementa al golpear las mini laminas del corrector de flujo, siguiente a este vienen una serie de mallas suaves que buscan corregir aún más el flujo y buscan que el flujo sea lo más suave posible, es decir mantener un flujo laminar. Claro está que el cálculo que se realizó al comienzo del análisis se buscó que el flujo volumétrico sea el apropiado para mantener un flujo laminar, esta sección busca corregir perturbaciones pequeñas que se puedan producir por la uniones de las secciones y corregir el flujo.

Ilustración 89 Corrector de flujo y sección de laminación.



Fuente: Realizada por el Autor.

Ilustración 90 Corrector de flujo.



Fuente: Realizada por el Autor.

El corrector de flujo debe tener una longitud tal que no ocasione turbulencia en el flujo, por tal motivo se analiza por medio del número Reynolds buscando que el flujo laminar se mantenga como tal, para esto tomamos los valores conocidos como la velocidad del flujo, número Reynolds máximo y la viscosidad del agua para poder hallar la longitud máxima del corrector.

Por lo tanto,

$$L = (N_R * \eta) / \rho v = (2000 * 1.3 \times 10^{-3} \text{kg/ms}) / (1000 \text{kg/m}^3 * 0.00925 \text{m/s}) = 0.28 \text{ m}$$

5.11. CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS DE DISEÑO

El túnel hidrodinámico hasta este punto se ha analizado en sus dimensiones, tuberías, tipo de bomba, pérdidas y ganancias de energía, se aplicó la ecuación de la energía y se hallaron las presiones en distintos puntos del sistema tanto en estado de reposo como en movimiento.

Los resultados muestran que si el flujo volumétrico calculado se mantiene constante el flujo en la sección de visualización será laminar regido por el rango que ofrece la regla de número Reynolds, es decir que este sea menor a 2000.

Las pérdidas de energía se hallaron en cada uno de los accesorios como válvulas, reductores, codos y la misma tubería, además de hallar las pérdidas en secciones como filtrado, laminación y difusores que se encuentran en la sección principal del túnel. Los resultados de estas pérdidas son satisfactorios ya que no tienen un alto

valor y no interfieren con el desempeño de la bomba. Está también se analizó se escogió una bomba con capacidad de proporcionar un flujo similar al deseado y garantizar un flujo laminar, su potencia aunque es un poco alta en comparación a la potencia requerida por el sistema no significa un riesgo para el mismo dado que la tubería y el material usado en la sección principal (laminación, visualización y filtrado) PMMA que es un material que resiste altas presiones.

Dichas presiones se analizaron por medio de la ecuación de Bernoulli y energía y son presiones que no generan peligro al sistema y este se comportará de forma eficiente siempre y cuando no existan obstrucciones en las líneas de trabajo (succión y descarga).

5.11.1. Características finales del túnel. El túnel consta de:

- Línea de Succión,
 - *Consta con dos diámetros de tuberías, una sección de 60cms aproximadamente de diámetro de 2", un reductor que une la sección de 2" con la de 1", sección de tubería de 1" con una longitud aproximada de 1.6 metros.*
- Bomba,
 - *Centrífuga,*
 - *Potencia = 1hp*
 - $Q = \frac{50lt}{min}$
 - *head o carga = 50m*
 - *Referencia qb – 80.*
- Línea de descarga,
 - *Consta con dos secciones de tubería una de 2" de diámetro un reductor y otra sección de 1".*
- Difusor,
 - *Sección en PMMA que desacelera el flujo de forma gradual y alista el flujo para ingresar a la sección de asentamiento o laminación.*
- Sección de laminación,
 - *En su interior cuenta con un corrector de flujo el cual busca eliminar turbulencias rotacionales que provienen de la línea de descarga conectada a la bomba.*
 - *También cuenta con 2 secciones de telas de laminación, es decir ayudan a que cualquier perturbación que se encuentre en el flujo se disipe y así garantizar un flujo laminar en la sección de visualización.*

- Sección de visualización,
 - *Flujo laminar con número Reynolds no mayor a 2100.*
 - *Soporte para probetas en su interior.*
 - *Tamaño nominal de 30x30x100 centímetros.*
 - *Compuerta hermética para acceso y manipulación de la probeta.*
 - *Líneas de inyección de tinta de color para visualización en la interacción flujo – probeta.*
- Sección de filtrado,
 - *Esta sección retiene objetos extraños que puedan causar daño al sistema, además tiene una compuerta que de acceso a su interior para remoción y limpieza del sistema.*
- Difusor-tobera,
 - *Reduce el área de flujo de forma gradual y conecta con la tubería de la línea de succión para dirigirla a la bomba.*
- Extras para limpieza,
 - *Aunque el análisis se hizo de forma para recircular agua, puede agregarse un sistema extra de limpieza con el fin de garantizar un flujo más limpio de las impurezas que pueden producir los objetos de prueba y las tintas utilizadas. Este filtro es el mismo utilizado para la recirculación de aguas de piscina o jacuzzi utilizando filtros intercambiables o lavables.*

6. MÉTODO DE VISUALIZACIÓN.

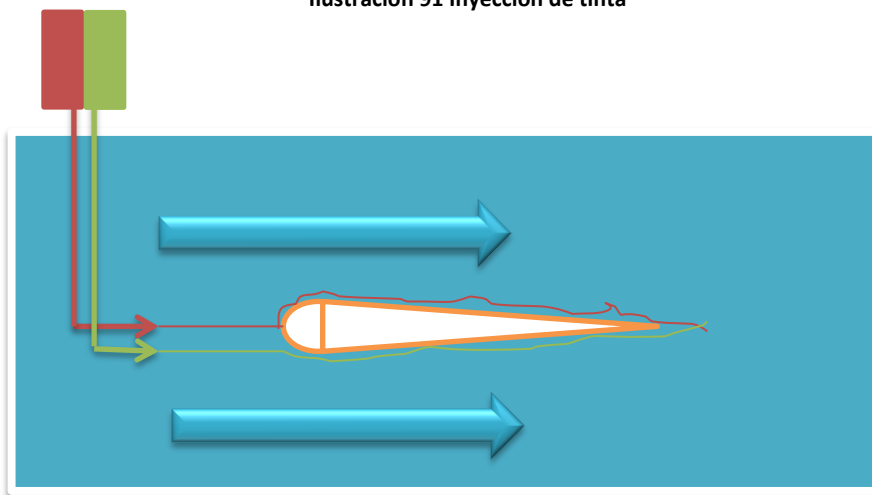
La visualización del flujo de un fluido es una forma efectiva para la comprensión de fenómenos físicos presentes en la interacción de un objeto en movimiento con un fluido o un fluido en movimiento con un objeto en reposo.

Existen varios métodos de visualización, algunos simples otros más complejos y costosos, en el caso de nuestro túnel el objetivo principal es poder mostrar de forma clara y didáctica estos fenómenos. Por tal motivo se aconseja utilizar los siguientes métodos.

6.1. MÉTODO DE INYECCIÓN DE TINTA

Este método es simple, económico y de fácil aplicación para pruebas en puntos locales del objeto en análisis. El objetivo de este método es inyectar una tinta de color por medio de una aguja al flujo en movimiento que se encuentra en la sección de visualización, esta tinta creará un hilo de color entre las capas del flujo tomando la misma dirección de esta y se acercará al objeto en análisis mostrando el comportamiento y camino de las partículas involucradas.

Ilustración 91 Inyección de tinta



Fuente: Realizada por el Autor.

Algunos parámetros a tener en cuenta en la aplicación de la tinta es el de obtener un número Reynolds adecuado para que la tinta se adjunte al flujo de forma

laminar y no turbulenta, es decir calcular con el diámetro del tubo de la aguja y un número Reynolds menor a 2000 y así obtener la velocidad adecuada, cabe resaltar que la velocidad debe ser menor que la velocidad del flujo para evitar perturbaciones. La densidad de la tinta debe ser lo más cercana a la del agua ya que es el medio en uso.

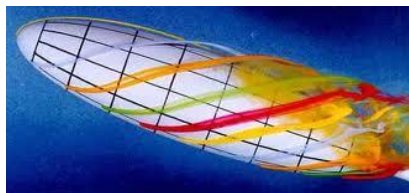
Para el análisis de las “streaklines” o líneas de trazo que se inyectan pueden referirse al libro “Fluid Mechanics: An Introduction to the Theory of Fluid Flows Escrito por Franz Durst” en el capítulo 4, sección 4.3.2. en esta sección el autor habla sobre como predecir el comportamiento de una línea de trazo una vez las partículas han sido marcadas con la tinta.

6.2. INYECCIÓN DE TINTAS A TRAVÉS DEL MODELO EN PRUEBA

Este método es similar al anterior, con la diferencia que la tinta no saldrá de una aguja inyectora sino del mismo objeto en prueba. Es decir el modelo debe crearse de tal forma que contenga perforaciones en lugares deseados o predeterminados para análisis. Los parámetros a tener en cuenta son los mismo al anterior, una densidad cercana, una velocidad menor a la del flujo para mantener un Reynolds laminar.

El inconveniente de este método es su misma ventaja pues para implementar las tintas dentro del modelo toma tiempo y un diseño especial del modelo para que las tintas puedan inyectarse al flujo, estas deben estar conectadas por medio de mangueras finas o delgadas bien adheridas y ser colocadas de tal forma que no interfieran en los análisis de la prueba creando perturbaciones. Y es una ventaja ya que si cumple con lo anterior la visualización es más precisa y se pueden apreciar los fenómenos más detalladamente al mismo tiempo.

Ilustración 92 Método local de inyección de tintas.⁶¹



Fuente Tomada en línea de <http://www.flometrics.com/flow-visualization.shtml>

⁶¹<http://www.flometrics.com/flow-visualization.shtml>

7. RECOMENDACIONES PARA CONSTRUCCIÓN Y MANTENIMIENTO DEL TÚNEL HIDRODINÁMICO

- a) La construcción del túnel hidrodinámico debe realizarse por secciones y realizar el debido acoplamiento entre componentes de modo que se puedan reemplazar las partes para mantenimiento.
- b) Entre secciones debe acoplarse un empaque que garantice el bloqueo de agua así esta no se filtre hacia el exterior y causar pérdidas de energía además de perturbaciones.
- c) Como se vio en el desarrollo de la investigación se aconseja usar tubería PVC ya que esta por su composición ayuda a que el agua no se contamine de agentes externos ni agregue elementos que pongan en riesgo el sistema.
- d) La fuente de movimiento es decir la bomba centrífuga no debe exceder la potencia recomendada en el análisis a no ser que se haya hecho algún tipo de análisis y modificación al diseño y que permita un aumento de presión sin que se afecte el sistema y que no cause perturbaciones en la sección de visualización ya que los resultados no serán exactos.
- e) La utilización de telas como correctores de flujo deben ser resistentes al agua por lo tanto se recomienda que su composición sea alta en poliéster o algún tipo de polímero que permita su uso prolongado. Otro tipo de telas tales como el algodón tendrán una vida corta de uso y tendrá que realizarse un mantenimiento continuo.
- f) Para la visualización por tintas se debe tener en cuenta el uso de tintas que no se disuelvan fácilmente con el agua pero que su densidad sea similar o cercana al agua para evitar resultados indeseados.
- g) En el mantenimiento del túnel una vez construido debe realizarse una limpieza similar a la de una piscina usando cloro y removiendo cualquier tipo de objeto o residuo que se encuentre en la sección de visualización o atrapado en la sección de filtrado.
- h) Cada vez que se realice una sesión de pruebas y que el agua muestre un deterioro debe realizarse el mantenimiento hablado en la sección anterior (g) (ver anexo A), dado que los filtros pueden encontrarse saturados de tinta y bajan la calidad de visualización y del agua.

8. ANÁLISIS Y RECOMENDACIONES DEL PROTOTIPO A ESCALA.

Para un mayor análisis del sistema diseñado se construyó un túnel a escala 1:3.75 con una bomba AT201 con la finalidad de visualizar posibles defectos de diseño, como también mejoras y obtener conclusiones.

Ilustración 93 Prototipo Túnel Hidrodinámico



Fuente: Autor

- Primera prueba: se encontraron fugas de agua las cuales concluyen que se debe realizar un ajuste perfecto entre componentes y verificar por escapes con el fin de no tener pérdidas de energía y resultados erróneos.
- Segunda prueba: se corrigieron las fugas, pero se encontró que el flujo de agua seguía su curso y no cumplía con el llenado del túnel por lo tanto el fluido solo alcanzaba la parte media del túnel, analizando el fenómeno se determina que se necesita una válvula que permita la salida de aire y así dar espacio para que el fluido (agua) llene el túnel hasta el límite superior. Se creó una válvula para el escape de aire y que a su vez permita cerrarse al alcanzar el nivel deseado.

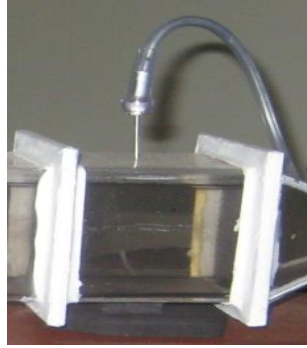
Ilustración 94 Problema de aire atrapado en el sistema.



Fuente: Autor

Tercera prueba: al tener la válvula implementada se pudo solucionar el problema de llenado, sin embargo la presión aumentó en el sistema ocasionando fugas de agua en algunos puntos débiles del túnel y se precisó la necesidad de una válvula de control de flujo.

Ilustración 95 Válvula de alivio de aire.



Fuente Autor

- Cuarta prueba: Para esta prueba se corrigieron las fallas vistas en la anterior prueba y se implementó una válvula de control de flujo en la línea de descarga notándose un flujo continuo pero turbulento en el comienzo de la sección de visualización ocasionando resultado erróneos. Se plantea implementar una válvula en la línea de succión con el fin de regular el flujo y así obtener un flujo laminar en la sección de visualización.
- Quinta prueba: Se implementó la válvula recomendada en la anterior prueba y se corrigió la turbulencia encontrada en el comienzo de la sección de visualización.

Ilustración 96 Implementación de válvulas de control.



Fuente: Autor

En la cuarta prueba se pudo apreciar que en la sección de filtrado y limpieza el flujo era laminar, por lo tanto la atención se fijó en este aspecto pues puede lograrse un flujo laminar a una mayor velocidad siempre y cuando haya una distancia suficiente en la sección de laminación. Una vez implementada la válvula en la quinta prueba el flujo fue corregido a laminar, claro está que a una velocidad menor.

Una vez corregidos los diferentes inconvenientes del sistema se procedió a implementar la inyección de tinta para visualizar de la interacción de fluido con la probeta. Se utiliza tinta “china” ya que permite una mejor visualización y su densidad es adecuada con respecto al agua disolviéndose en el tanque de alimentación y no perjudica el sistema ni cambia la densidad del agua forma notoria.

Ilustración 97 Implementación de inyección de tinta en zona de pruebas.



Fuente: Autor

- Sexta prueba: el sistema funciona de forma satisfactoria después de realizar una serie de ajustes y calibraciones en las válvulas de control de ambas líneas, luego se procede a inyectar tinta en la parte anterior de la probeta obteniendo una visualización clara del resultado de la interacción.

La probeta es un perfil alar esbelto y con un ángulo de 10° que se implementó con el fin de corroborar el flujo.

9. CONCLUSIONES

El túnel hidrodinámico es una gran herramienta de visualización y apoyo para diseño de componentes los cuales dependen de una geometría especial, aerodinámicas y/o hidrodinámicas, por lo tanto la viabilidad de usar el túnel desarrollado en este documento es alta dado que con el prototipo creado aún al ser una escala menor, este mostró un buen manejo de la corriente de agua llegando a la zona de visualización de forma clara y homogénea, es decir el flujo se denota laminar y la capa límite no interfiere en la zona de la probeta ya que la dimensión de la capa límite es baja al utilizar la velocidad recomendada en el documento y sin exceder ésta garantizando que exista un flujo laminar constante.

El uso de tintas permite una visualización clara de los fenómenos resultantes de las pruebas ayudando a rediseñar el objeto en estudio. Las tintas deben ser de una densidad similar a la del agua y deben ser aplicadas con flujo existente de lo contrario se creará una contaminación del agua y no permitirá obtener un resultado óptimo.

La construcción del sistema es simple, siempre y cuando las partes y componentes se realicen y acoplen apropiadamente, las zonas más vulnerables a tener escapes de agua o filtraciones son las zonas de acoplamiento entre las secciones de visualización, asentamiento y filtrado, por lo tanto debe utilizarse empaques que impidan el escape de agua y si se utiliza tornillos para el acoplamiento estos no deben sobrepasar un torque apropiado para no causar separación de materiales y por lo tanto escapes de agua. El acoplamiento debe ser lo más liso posible y así garantizar que el flujo no tendrá perturbaciones ajenas a las de pruebas realizadas en el sistema, para tal objetivo las secciones deben ser cortadas y construidas de tal manera que se acoplen perfectamente.

El mantenimiento del sistema es simple al usar un proceso similar al de limpieza de piscinas donde se utiliza cloro y remoción de objetos extraños que se encuentren dentro de alguna de las secciones del túnel. Este proceso se anexa al final del documento.

BIBLIOGRAFÍA

MOTT, Robert L. , Mecánica de fluidos. México: Pearson Educación, 2006. Capítulos 1,2,3,4,6,7,8,9,10,11,13.

GARY, Erickson. PEAKE, David. DEL FRATE, John. SKOW, Andrew. GERALD, Malcolm. , Water Facilities in Retrospect and prospect- an illuminating Tool for Vehicle Design, NASA Technical Memorandum 89409, California, USA: 1986. 1-31p

DEL FRATE, John H. , NASA Dryden Flow Visualization Facility, NASA Technical Memorandum 4631. Edwards California USA: Dryden Flight Research Center, 1995. 2-29p

VAN DYKE, Milton y Sylvia. , An Album of Fluid Motion. Stanford, California USA: The Parabolic Press, 1982. 1-177p

SAMIMY, M. BREUER, K.S. LEAL, L.G. STEEN, P.H. , A Gallery of Fluid Motion. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2003. 1-129p

ROLLING HILLS RESEARCH CORPORATION, Research Water tunnels Specifications. California, USA, 2003. 1-22p

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Documentación. Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. NTC 1486. Sexta Actualización. Bogotá : 2006, p.1.

FUERZAS DE PRESIÓN HIDRÁULICA [En línea]. Cauca Colombia. Universidad del Cauca, 2010- [citado Enero 20 2013]. Disponible en internet: artemisa.unicauca.edu.co

WIND TUNNELS [En línea]. California. Glenn Research Center NASA, [citado Enero 2013]. Disponible en internet: www.grc.nasa.gov

WIND TUNNELS DESIGN [En línea]. California. Glenn Research Center NASA, [citado Enero 2013]. Disponible en internet: www.grc.nasa.gov

INTERNAL RECIRCULATION [En línea]. USA. [citado Febrero 2013]. Disponible en internet: www.mcnallyinstitute.com

CAVITATION [En línea]. USA. [Citado Febrero 2013]. Disponible en internet: www.engineeringtoolbox.com

BOMBAS CENTRÍFUGAS [En línea]. Colombia. [Citado Marzo 13 2013]. Disponible en internet: www.slideshare.net/mecanicadefluidos/bombas-centrifugas-7934169

MANTENIMIENTO DE PISCINAS [En línea]. Colombia. [Citado Enero 15 2014]. Disponible en internet: <http://www.jofeg.com/es/descargas/mantenimiento.pdf>

STREAMLINES AROUND A NACA 0012[En línea]. Colombia. [Citado Enero 15 2014]. Disponible en internet: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Streamlines_around_a_NACA_0012.svg

ANEXO A. LIMPIEZA Y MANTENIMIENTO DEL TÚNEL.

El túnel al ser un sistema similar al de una piscina, su mantenimiento y limpieza puede realizarse de forma similar, añadiendo cloro y acoplado un sistema de filtrado, donde el filtro es intercambiable y lavable.

El siguiente párrafo fue tomado del “manual de mantenimiento de su piscina” de <http://www.jofeg.com/es/descargas/mantenimiento.pdf>, quienes ilustran de una forma adecuada el por qué la utilización de filtros y el procedimiento de limpieza.

Ilustración 98 consejo para uso de filtros en la limpieza.

El aire, los bañistas y el entorno introducen suciedad al agua lo que causa turbidez y se convierte en el alimento de bacterias y algas.

Por ello, es necesario eliminarlas con la ayuda del equipo de filtración. El filtro retiene las partículas de suciedad, manteniendo el agua transparente y cristalina. Es importante que el filtro trabaje en buenas condiciones y que todo el volumen de agua sea filtrado como mínimo una vez al día.

Fuente: 5 <http://www.jofeg.com/es/descargas/mantenimiento.pdf>

Según el siguiente artículo debe utilizarse un producto anti algas como también cloro para una limpieza adecuada del agua. Se aconseja que por cada 100m^3 de agua debe aplicarse un litro de producto anti alga y cloro, como el túnel aproximadamente tiene un volumen de 0.2m^3 solo se tendrá que aplicar una pequeña porción 2cm^3 de anti alga será suficiente.

Manual de mantenimiento de su piscina

Tratamiento del agua

Para disponer de un agua cristalina y desinfectada, le recomendamos el siguiente tratamiento.

Tratamiento inicial

Realice una cloración de choque con 15 g. de **dicloro granulado** o con 1 ó 2 tabletas de cloro rápido, dosificando el producto a través de los skimmers. Tiene que complementar esta cloración con la adición de un producto antialgas tal como el **antialgas concentrado** o el **antialgas extra**, a razón de 1 litro cada 100 m³ de agua.

Tratamiento de mantenimiento

La adición de cloro al agua de la piscina se realiza con el producto **compactos de tricloro** (1 compacto por cada 20 m³ de agua, semanalmente). Los compactos se colocan periódicamente en los skimmers o en un dosificador. Aproximadamente una vez por semana, debe comprobarse el nivel de compactos y reponerlos si es preciso. Este tratamiento le proporciona una gran independencia y le asegura un residual de cloro las 24 horas del día.

La acción desinfectante del cloro debe complementarse, una vez por semana, con la adición de un producto antialgas, tal como **antialgas concentrado** o el **antialgas extra**, dosificando el producto directamente al agua, a razón de 1/4 de litro por cada 100 m³ de agua.

ANEXO B. PRESUPUESTO

Para la construcción del túnel hidrodinámico es necesario reunir una serie de costos operacionales. En estos costos se incluye materiales, equipos, transporte y algunos servicios privados como el de corte de materiales y modificaciones que usualmente a la hora de construir un prototipo pueden aparecer. Estos gastos aparecerán en la casilla de contingencia. Esta casilla se crea con el objetivo de poder tener recursos ante algún imprevisto que ocurra.

Tabla 27 Presupuesto protipo analizado.

COSTOS OPERACIONALES						
	características	cantidad		Valor unitario	Contingencia 10%	Valor total
Materiales						
Láminas de Acrílico	19 x 13 x 0.010 m	2		\$ 300,000.00	\$ 60,000.00	\$ 660,000.00
Pegantes	silicona líquida	3		\$ 5,200.00	\$ 1,560.00	\$ 17,600.00
	tubería pvc	2		\$ 4,700.00	\$ 940.00	\$ 10,340.00
	limpiador de pvc	2		\$ 2,500.00	\$ 500.00	\$ 5,500.00
Quincallería	tornillos 1/2"	1	pkt	\$ 20,000.00	\$ 2,000.00	\$ 22,000.00
	tuercas 1/2"	1	pkt	\$ 20,000.00	\$ 2,000.00	\$ 22,000.00
	arandelas 1/2"	1	pkt	\$ 20,000.00	\$ 2,000.00	\$ 22,000.00
	abrazaderas	10		\$ 2,700.00	\$ 2,700.00	\$ 29,700.00
Tubería PVC	tubo 2"	4	mts	\$ 10,500.00	\$ 4,200.00	\$ 46,200.00
	tubo 1"	3	mts	\$ 8,500.00	\$ 2,550.00	\$ 28,050.00
	Codos 2"	1	pkt	\$ 5,600.00	\$ 560.00	\$ 6,160.00
	Codos 1"	1	pkt	\$ 5,600.00	\$ 560.00	\$ 6,160.00
	conectores 1"	2		\$ 7,200.00	\$ 1,440.00	\$ 15,840.00
	conectores 2"	2		\$ 12,150.00	\$ 2,430.00	\$ 26,730.00
	reductores	2		\$ 6,000.00	\$ 1,200.00	\$ 13,200.00
Válvulas PVC	Bola 1"	3		\$ 6,630.00	\$ 1,989.00	\$ 21,879.00
	Bola 2"	3		\$ 27,900.00	\$ 8,370.00	\$ 92,070.00
SUBTOTAL MATERIALES					\$	1,044,989.00
Equipo						
Plataforma	mesa metálica	1		\$ 600,000.00	\$ 60,000.00	\$ 660,000.00
Herramientas	Juego de Llaves	1		\$ 29,900.00	\$ 2,990.00	\$ 32,890.00
	Juego de destornilladores	1		\$ 34,000.00	\$ 3,400.00	\$ 37,400.00
	Taladro	1		\$ 99,000.00	\$ 9,900.00	\$ 108,900.00
	bomba centrífuga	1		\$ 400,000.00	\$ 40,000.00	\$ 440,000.00
	caudalímetro	1		\$ 1,200,000.00	\$ 120,000.00	\$ 1,320,000.00
SUBTOTAL EQUIPO					\$	2,599,190.00
Transporte						
	transporte	2		\$ 50,000.00	\$ 10,000.00	\$ 110,000.00
Servicios						
	Corte de láminas	20		\$ 20,000.00	\$ 40,000.00	\$ 440,000.00
SUBTOTAL TRANSPORTE Y SERVICIOS					\$	550,000.00
Kit de pruebas						
	Balso	3		\$ 2,000.00	\$ 600.00	\$ 6,600.00
	sellante	2		\$ 6,000.00	\$ 1,200.00	\$ 13,200.00
	herramientas	1	pkt	\$ 20,000.00	\$ 2,000.00	\$ 22,000.00
	tintas	3		\$ 13,000.00	\$ 3,900.00	\$ 42,900.00
	soportes y estructura	1	pkt	\$ 40,000.00	\$ 4,000.00	\$ 44,000.00
SUBTOTAL KIT DE PRUEBAS					\$	128,700.00
				TOTAL	\$	4,322,879.00

Cabe anotar que el presupuesto no incluye costos de mano de obra ni tiempo de investigación.

La siguiente tabla muestra los costos relacionados con la construcción del prototipo a escala. (Véase Ilustración 93).

Tabla 28 Presupuesto prototipo escala 1:3.75

COSTOS OPERACIONALES						
	características	cantidad		Valor unitario	Contingencia 0%	Valor total
Materiales						
Láminas de Acrílico	19 x 13 x 0.010 m	2		\$ 100.000,00		\$ 200.000,00
Pegantes	silicona líquida	3		\$ 5.200,00		\$ 15.600,00
	tubería pvc	2		\$ 4.700,00		\$ 9.400,00
	limpiador de pvc	2		\$ 2.500,00		\$ 5.000,00
Quincallería	tornillos 1/2"	1	lb	\$ 3.000,00		\$ 3.000,00
	tuercas 1/2"	0	pkt	\$ 3.000,00		\$ -
	arandelas 1/2"	0	pkt	\$ 3.000,00		\$ -
	abrazaderas	0		\$ 2.700,00		\$ -
Tubería PVC	tubo 2"	0	mts	\$ 2.500,00		\$ -
	tubo 1"	6	mts	\$ 1.800,00		\$ 10.800,00
	Codos 2"	0	pkt	\$ 5.600,00		\$ -
	Codos 1"	6	pkt	\$ 500,00		\$ 3.000,00
	conectores 1"	0		\$ 7.200,00		\$ -
	conectores 2"	0		\$ 12.150,00		\$ -
	reductores	0		\$ 6.000,00		\$ -
Válvulas PVC	Bola 1"	2		\$ 6.630,00		\$ 13.260,00
	Bola 2"	0		\$ 27.900,00		\$ -
SUBTOTAL MATERIALES					\$	260.060,00
Equipo						
Plataforma	mesa madera	1		\$ 150.000,00		\$ 150.000,00
Herramientas	brocas	1		\$ 10.000,00		\$ 10.000,00
	Juego de destornilladores	1		\$ 34.000,00		\$ 34.000,00
	Taladro	0		\$ 99.000,00		\$ -
	bomba centrífuga	1		\$ 65.000,00		\$ 65.000,00
	caudalímetro	0		\$ 1200.000,00		\$ -
SUBTOTAL EQUIPO					\$	259.000,00
Transporte						
	transporte	1		\$ 50.000,00	\$ -	\$ 50.000,00
Servicios						
	Corte de láminas	20		\$ 20.000,00	\$ 40.000,00	\$ 440.000,00
SUBTOTAL TRANSPORTE Y SERVICIOS					\$	490.000,00
Kit de pruebas						
	Balso	3		\$ 2.000,00	\$ 600,00	\$ 6.600,00
	sellante	2		\$ 6.000,00	\$ 1.200,00	\$ 13.200,00
	herramientas	0	pkt	\$ 20.000,00	\$ -	\$ -
	tintas	1		\$ 6.000,00	\$ 600,00	\$ 6.600,00
	soportes y estructura	1	pkt	\$ 10.000,00	\$ 1.000,00	\$ 11.000,00
SUBTOTAL KIT DE PRUEBAS					\$	37.400,00
TOTAL					\$	527.400,00

ANEXO C. DIMENSIONES TÚNEL HIDRODINÁMICO.

Ilustración 99 Vista lateral Difusores.

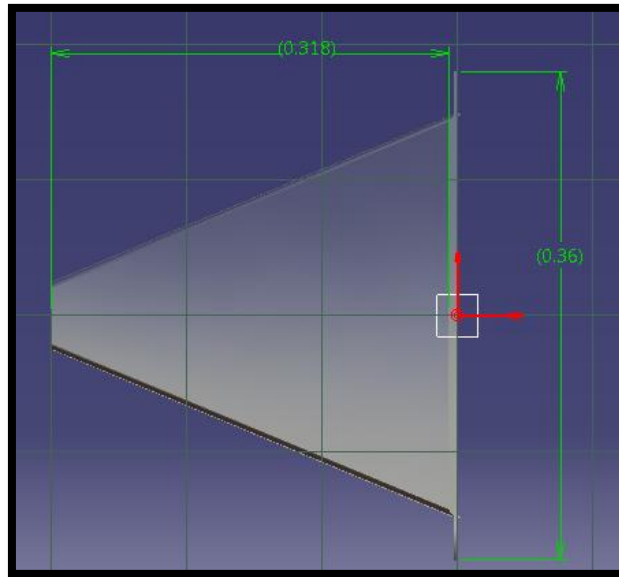


Ilustración 100 Vista Frontal Difusores.

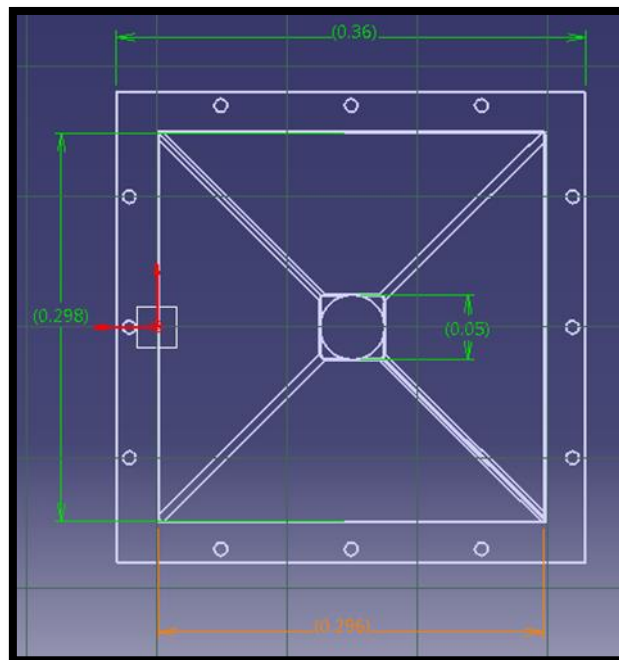


Ilustración 101 Tapa sección de prueba.

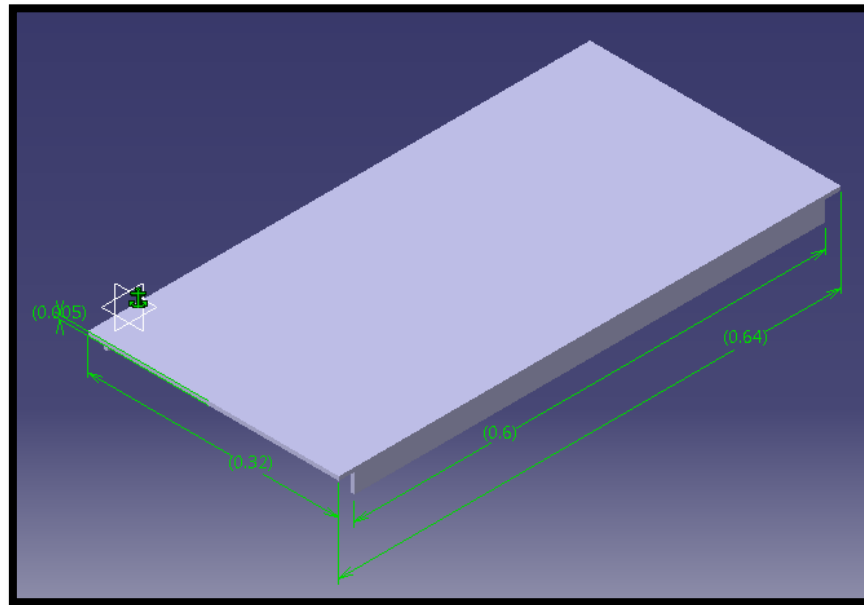


Ilustración 102 Sección de prueba.

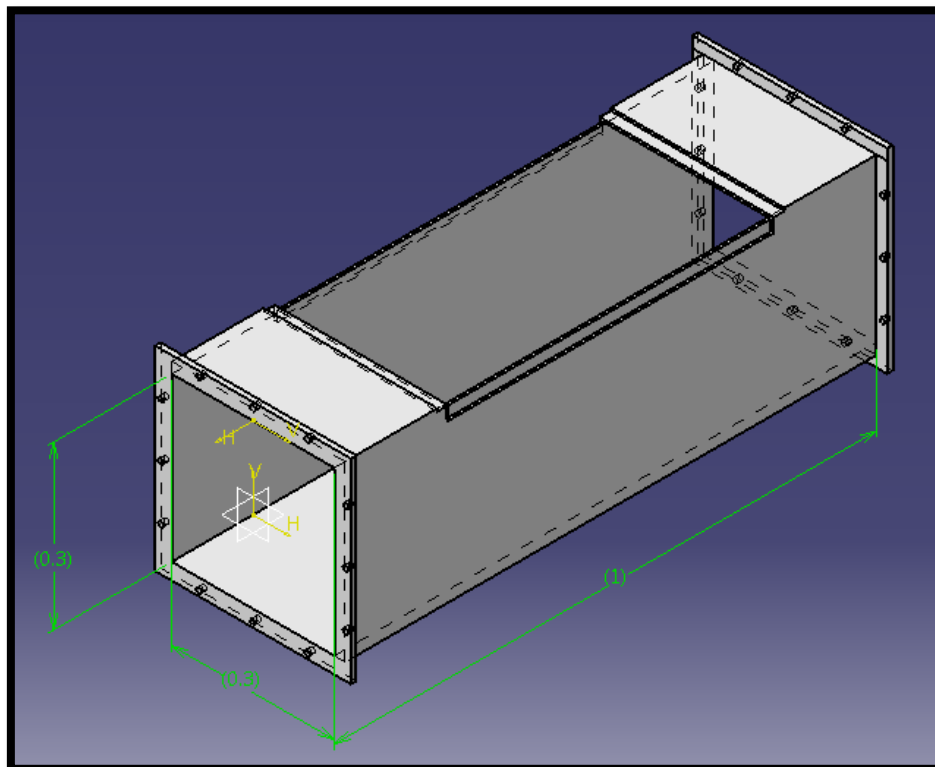


Ilustración 103 Vista preliminar Túnel Hidrodinámico.

